QUANTITATIVE UNTERSUCHUNGEN ÜBER POSITIVE NACHBILDER

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER UNIVERSITÄT LEIPZIG

ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT VON

RICHARD HELLMUTH GOLDSCHMIDT

AUS WIESBADEN

LEIPZIG

WILHELM ENGELMANN

1910

Angenommen von der philosophisch-historischen Sektion auf Grund der Gutachten der Herren WUNDT und WIENER.

Leipzig, den 6. Mai 1910.

Der Procancellar
R. ROHN.

Sonderabdruck aus: »Wundt, Psychologische Studien«, Bd. VI, Heft 3 und 4.

INHALTSVERZEICHNIS

I. Literaturgeschichtliche Einleitung zur Fragestellung 159
II. Besprechung der Aufgabe und ihrer Lösungsmöglichkeit 174
III. Schilderung der Versuchsweise. (Kurze Skizze der Versuchsanordnung) . . 180
IV. Beschreibung der Versuchsanordnung 183
V. Kritik der Versuchsweise und die dazu nötigen Vorversuche 201
VI. Die Ergebnisse der Hauptversuchsreihen 220
VII. Kurze Zusammenfassung der Hauptergebnisse der Arbeit 250

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535728_0046

Quantitative Untersuchungen über positive Nachbilder.

Von

Richard Hellmuth Goldschmidt.

Mit 8 Figuren im Text.

I. Literaturgeschichtliche Einleitung zur Fragestellung.

Goethe darf in einer Untersuchung über »die Fortdauer eines Lichteindrucks« als erster genannt werden: er prägte nämlich nicht nur diesen Begriff[1]), er hat auch als erster die hierhergehörigen Erscheinungen »als Anfang und Ende« aller Farbenlehre vorangestellt, Erscheinungen, »die auch wohl nach und nach in ihrem ganzen Wert und Würde anerkannt, und anstatt daß man sie vorher als flüchtige Augenfehler betrachtete, nunmehr als Norm und Richtschnur alles übrigen Sichtbaren festgehalten werden«[2]). Freilich wurden die von Goethe beschriebenen Tatsachen zumeist schon vor ihm beobachtet und geschildert, oft sogar bezüglich nebensächlicher Einzelheiten genauer[3]). So gibt es auch über die Erscheinungen, die nach dem Verschwinden eines Lichtreizes gesehen werden können, über die heute als Nachbilder bezeichneten Erscheinungen, eine Reihe von

[1]) Die Bemerkungen Goethes sind nach der Weimarer Ausgabe zitiert: Goethe, Werke, II. Abt., Bd. 1, S. 1—135, Zur Farbenlehre, Didaktischer Teil, 1. und 2. Abt.; Bd. 3, S. 314 u. f.; Bd. 4, S. 85, S. 112—114, S. 196—200, Zur Farbenlehre, Historischer Teil I. und II., 2., 5. und 6. Abt.; Bd. 5,I, S. 336 u. f., Nachträge zur Farbenlehre, Physiologe Farben.

[2]) a. a. O. II., 5,I, S. 336.

[3]) Scherffer spricht z. B. von einer Reihe spezieller Versuchsbedingungen zur Erzeugung von »zufälligen Farben« (Nachbildern), deren Einzelheiten Goethe übergeht, deren Wesentliches er aber in einem Satze zusammenfaßt, 1761. Scherffer, Diss. de coloribus accidentalibus. Viennae. 1765. Scherffer, Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien; übersetzt im Journ. de Physique de Rozier. XXVI. S. 175 und 273.

Arbeiten, die er großenteils selbst zitiert, so wie einige, deren Erwähnung sich erst wieder bei Aubert[1]) und Helmholtz[2]) findet; wären die Schriften der mittelalterlichen Mystiker besser bekannt, so würden sich wahrscheinlich diese Literaturnachweise noch erheblich ergänzen lassen. Goethe ist aber der erste, welcher derartige »Erscheinungen« »in eine gesetzmäßige Formel gebracht«[3]) hat; und zu seiner Zeit etwa beginnt eine Untersuchung der Erscheinungen mit immer exakter werdenden Hilfsmitteln, so daß die vor ihm mehr gelegentlich gemachten Beobachtungen ein nur historisches Interesse haben. Der Einzige, der neben oder vor Goethe genannt werden könnte, ist der als Naturforscher und als Ethnologe berühmte Buffon. Gerade die Nebeneinanderstellung von Buffon und Goethe läßt indes die besondere Bedeutung des letzteren klar hervortreten. Buffon interessiert sich für die physiologischen Vorgänge in der Netzhaut, und die »subjektiven Erscheinungen« sind ihm nur »couleurs accidentelles«; er sucht zu zeigen, wie die zufälligen Farben, die auf Rechnung der besonderen Zustände des Auges kommen, mit den natürlichen Farben, welche dem Licht eigentümlich sind, zusammenhängen[4]), und die Kenntnis der zufälligen Farben interessiert ihn nur, weil er daraus auf retinale Vorgänge schließen zu können glaubt; die physiologischen Termini seiner Zeit decken sich bei ihm vollkommen mit seinen Gedanken. Man könnte Buffon als einen Begründer der physiologischen Optik feiern. Goethe bewahrt auch bei wissenschaftlichen Arbeiten sein künstlerisches Interesse am Menschen[5]), deswegen beschäftigen ihn nur seelische Erscheinungen, also Gegenständlichkeiten des objektiven Wirklichkeitszusammenhangs nur so, wie sie direkt anschaulich gegeben sind, d. h. nur wie sie sich durch Selbstbeobachtung finden lassen, nicht aber wie sie als in objektivem Zusammenhang stehend gedacht werden können. In seinen wissen-

---

[1]) H. Aubert, Physiologie der Netzhaut, 1865, S. 354 u. f. und H. Aubert, Grundzüge der physiologischen Optik, 1876 (Graefe-Saemisch, Handbuch der ges. Augenheilkunde. S. 508 u. f.).

[2]) H. v. Helmholtz, Handb. der physiologischen Optik², 1885—1896, S. 536/537 und S. 1231 u. f.

[3]) Goethe, sein Leben und seine Werke von Dr. A. Bielschowsky, 1904, Bd. II, S. 447.

[4]) Buffon, Mem. de l'Ac. de Paris, 1743, S. 215.

[5]) Vgl. hierzu H. v. Helmholtz, Handb. d. physiologischen Optik², S. 306/307.

schaftlichen Arbeiten ringt Goethe nach Zielen, wie sie der moderne Psychologe anstrebt; er betrachtet alle Erscheinungen vom Standpunkt des Psychologen aus, nämlich von dem aller unmittelbaren Erfahrung, wie sie sich durch Selbstbeobachtung gewinnen läßt[1]). Sein Denken ist durchweg durch seine psychologischen Interessen bestimmt, so daß er alles, selbst Tatsachen, die von einem ganz anderen Standpunkt, z. B. dem physikalischen Newtons, aus betrachtet waren, in seinem Streben nach einheitlicher Erfassung der Welt durch unmittelbare Anschauung erkennen möchte und so gleichsam psychologisierend an ihnen herumdeutelt. Er übersieht dabei, daß die Gestaltung eines einheitlichen Weltbildes nicht durch Selbstbeobachtung sich vollbringen läßt, überhaupt nicht Aufgabe des Psychologen, sondern des Philosophen ist. Wie Goethe die durch seinen Standpunkt bedingte Abgrenzung seiner Aufgabe nicht klar erkannte, so fand er auch noch nicht die Betrachtungsweise, welche ihn direkt zu seinem Ziele hätte führen können; vielmehr übernahm er von den zeitgenössischen Gelehrten deren physiologische Denkweise, indem er die von ihm beobachteten Geschehnisse als physiologische Vorgänge ansah, wenn auch sein Standpunkt sich mit dem ihren nicht deckte. Er gewann den neuen psychologischen Interessenkreis, ohne sich klar bewußt zu werden, wie weit er deswegen hätte umdenken müssen. Es wäre interessant dies im einzelnen zu untersuchen, und es ließe sich in einer Gegenüberstellung von seinen und Buffons Lehren ausführen; dann würde Goethe wohl statt mit Kalischer als »Urheber« »einer neuen Wissenschaft der physiologischen Optik«[2]) als ein Begründer der Psychologie anzusehen sein. Schon weil er die »Eindrucksmethoden« schuf, ist er unter die Begründer nicht nur der Lehre vom Sehen, sondern der experimentellen Psychologie überhaupt zu zählen[3]). Die Fehler der Goetheschen Farbenlehre sind heute leicht zu korrigieren und werden reichlich durch die für die Psychologie grundlegende Bedeutung dieser

---

[1]) Vgl. zu der Definition W. Wundt, Grundriß der Psychologie[9], 1909, § 1.

[2]) Goethe, sein Leben und seine Werke von Dr. A. Bielschowsky, 1904, Bd. II, S. 447.

[3]) Zu »Goethe als Begründer der Eindrucksmethoden« s. Wundt, Phys. Psych.[5], Bd. II, S. 274. Vergl. ferner Wundt, Phys. Psych.[5], Bd. II, S. 162/163, S. 248. S. 322/323, S. 331, Bd. III, S. 145, S. 478, S. 632.

Schrift aufgewogen; er hat als erster das zu seiner Zeit bekannte Tatsachenmaterial zur Lehre vom Sehen für den psychologisch Interessierten gesichtet[1]) und hat es zum Teil auch ergänzt[2]) und in einer noch heute befriedigenden Form geordnet[3]). Grundlegend heißt hier seine Arbeit nicht etwa in dem Sinne, daß die späteren Autoren von ihr auszugehen pflegten, oder daß gar ohne sie deren Arbeiten überhaupt nicht denkbar wären, sondern nur in dem Sinne, daß eine im Gang der Entwicklung gerade erreichte Stufe sich zuerst und deutlich in ihr erkennen läßt. In Goethes Farbenlehre ist eine für den Psychologen hervorragend wichtige Entwicklungsstufe erreicht: zum ersten Male ist in einer Lehre vom Farbenempfinden seinen Interessen Rechnung getragen. Man hat freilich erst etwa ein halbes Jahrhundert später dem psychologischen Standpunkt entsprechend umgedacht und noch beibehaltene physiologische Tatsachenschilderungen als Bilder für psychische Geschehnisse betrachtet; diese Bilder möglichst durch Analogien aus der Psychologie zu ersetzen, versucht man erst in neuester Zeit. In der Goetheschen Farbenlehre aber besitzt der Psychologe für einen geschichtlichen Rückblick zur Lehre vom Sehen das erste ganz seinen Zwecken dienende Werk, daher ist es für ihn zum Ausgangspunkt besonders geeignet, auch in Untersuchungen wie der vorliegenden, wofür der ins einzelne gehende Nachweis sich erübrigt, während es schon aus praktischen Gründen berechtigt ist, seine klassische Schilderung zweier grundlegender Versuche voranzustellen:

»Wer auf ein Fensterkreuz, das einen dämmernden Himmel zum Hintergrunde hat, . . . scharf hinblickt und sodann . . . gegen einen ganz dunkeln Ort hinsieht, wird

---

[1]) Nämlich in dem Didaktischen Teil zur Farbenlehre hob er gerade die für den Psychologen wichtigen Erscheinungen hervor; sein psychologisches Interesse zeigt sich auch in der Disposition dieser Arbeit, die Arbeit ist nämlich zumeist nach Gesichtspunkten geordnet, wie sie ein moderner Psychologe hätte wählen können.

[2]) So gab er quantitative Bestimmungen für den zeitlichen Verlauf der Blendungserscheinungen (a. a. O. II, 1: IV, 41). Daß die aus seinen Beobachtungen von ihm gezogenen Schlüsse ihn auch manchmal zu berechtigten Folgerungen führten, zeigt z. B. sein Hinweis auf den Gegensatz von Hell- und Dunkeladaptation oder seine Behauptung von der Schädlichkeit roter und grüner Augengläser (a. a. O. II, 1: IV, 55), wobei seine Lehre den heutigen klinischen Anschauungen entspricht.

[3]) Dies führt H. Siebeck, Goethe als Denker² S. 123 u. f. näher aus.

ein schwarzes Kreuz auf hellem Grunde noch eine Weile vor sich sehen. Blickt man, indessen der Eindruck obgedachten Fensterbildes noch dauert, nach einer hellgrauen Fläche, so erscheint das Kreuz hell und der Scheibenraum dunkel . . .« [1]).

Wie zuerst Brücke [2]), nennt man heute die erste dem Reize gleichartige Erscheinung ein positives Nachbild, die zweite, in ihren Helligkeitsverhältnissen umgekehrte, ein negatives Nachbild [3]).

Die Eigenschaften der Nachbilder genau zu untersuchen, forderte schon Goethe, und er selbst charakterisiert ihren Verlauf vorläufig: Wir werden das uns vorschwebende Gespenst immer größer erblicken, je weiter von uns es durch irgendeine Fläche aufgefangen wird. Die Dauer der Nachbilder ist um so länger, je intensiver der Hauptreiz war, »analoge Erscheinungen« zeigen sich, »wenn dem Auge eine schon spezifizierte Farbe geboten wird« [4]), »sowohl an Größe als an Deutlichkeit verlieren« sie »nach und nach«, und »von der Peripherie herein« nehmen sie ab, so daß insbesondere »bei viereckten Bildern sich nach und nach die Ecken abstumpfen und zuletzt ein immer kleineres rundes Bild vorschwebt«. In seinen theoretischen Besprechungen sagt Goethe allgemein zu diesen und anderen Erscheinungen: »wie sich die Netzhaut gegen Hell und Dunkel überhaupt verhält, so verhält sie sich auch gegen dunkle und helle einzelne Gegenstände«, d. h.: eine Lichterregung bewirkt einen lokalen Adaptationsvorgang; dessen Bedeutung als die einer Erregbarkeitsänderung hat nun Wirth [5]) dadurch nachgewiesen, daß er die Zunahme der Quantität der negativen Nachbilder mit der

---

[1]) a. a. O. II, 1, S. 8 und 10 (I, §§ 20 und 29).

[2]) Pogg. Annal., Bd. LXXXIV, S. 436; Brücke nennt: »ein positives Nachbild ein solches, in dem das hell ist, was im Objekte hell ist, und das dunkel, was im Objekte dunkel ist; negativ dagegen ist das Nachbild, bei welchem das hell ist, was im Objekte dunkel ist, und umgekehrt«.

[3]) Von Nachbildern überhaupt sprach zuerst Purkinje, und Goethe übernahm von ihm in seinen späteren Schriften diesen Ausdruck.

[4]) a. a. O. I, § 47 u. f., freilich beobachtete er hier nur negative komplementäre Nachbilder. Was er über das farbige Abklingen blendender farbloser Reize sagt, sondert schon er von den eigentlichen Nachbildererscheinungen, und das darf hier übergangen werden.

[5]) W. Wirth, Der Fechner-Helmholtzsche Satz... Wundt, Philos. Stud., Bd. XVI (1900), Heft 4, S. 499/500.

Intensität der neu hinzutretenden Lichtreize feststellte. Hiermit ist angedeutet, eine wie weit gehende theoretische Bedeutung das Studium der Nachbildererscheinungen hat: für die Betrachtung eines speziellen Lichtempfindungsvorganges und damit des Lichtempfindens überhaupt ist es von grundlegender Bedeutung [1]). Der Forderung Goethes, die Nachbildererscheinungen eingehend zu studieren, ist seither in hohem Maße entsprochen worden; so sehr, daß es hier nicht angängig ist, über die gesamte Literatur einen Überblick zu geben, zumal da in neueren Arbeiten verschiedentlich ein geschichtlicher Rückblick gegeben wurde: von Martius [2]), Hamaker [3]), Wirth [4]), Mc. Dougall [5]), Klein [6]) und Dittler und Eisenmeier [7]). Weitere Orientierung gewähren die Handbücher von Helmholtz, Nagel und Wundt. Hier interessiert nach der allgemeinen Übersicht nur, was zu einer speziellen Fragestellung führt, und was zu deren Lösung wichtig ist.

Positive und negative Nachbilder sind zumeist gesondert untersucht worden; das ist leicht erklärlich und erscheint zweckmäßig, weil die für ihre Untersuchung günstigen Versuchsbedingungen manches Gegensätzliche haben; so ergibt sich schon aus dem Goetheschen Fundamentalversuch, daß als reagierendes Licht, d. h.

---

1) Deswegen ist es natürlich nicht gerechtfertigt, eine grundlegende Bedeutung zu der grundlegenden Bedeutung zu machen, in der Art wie in älteren Theorien der Lichtempfindungen hauptsächlich eine Gruppe von Erscheinungen betrachtet wurde; vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[5], Bd. II, S. 233 u. f.

2) Martius, Beiträge zur Psychologie und Philosophie, Bd. I (1896), Heft 1, S. 17 u. f.

3) Über die Nachbildbeobachtungen mit bewegtem, insbesondere auch mit homogenfarbenem Lichtreiz: Hamaker, Nachbilder nach momentaner Helligkeit, Zeitschr. f. Psychol., Bd. XXI (1899), S. 3 u. f.

4) Wirth, a. a. O. (1900), Über die Untersuchungen des Helligkeitswertes negativer Nachbilder.

5) Besonders über die englische Literatur von Nachbilduntersuchungen: Mc. Dougall, The sensations excited by a single momentary stimulation of the eye. Brit. Journ. of Psychol. Bd. I (1904—1905) S. 78 u. f.

6) Er gab eine Zusammenstellung der verschiedenen vorkommenden Nachbildererscheinungen mit einer eigenen Terminologie: Klein, Nachbilder, Übersicht und Nomenklatur, Arch. f. Physiol. (1908) Supplementband, S. 219 u. f. . . Das positive Nachbild heißt bei Klein tertiäres α-Nachbild.

7) Über die Beobachtungen verschiedener Nachbildphasen nach bewegtem Lichtreiz: Dittler und Eisenmeier, Über das erste positive Nachbild nach kurzdauernder Reizung des Sehorganes mittels bewegter Lichtquelle. Pflüg. Arch. (1909), S. 610 u. f.

als »das auf die veränderte Netzhautstelle einwirkende Licht«[1]) nach der Einwirkung eines hellen Lichtreizes für positive Nachbilder eine möglichst dunkle Fläche, für negative Nachbilder dagegen eine helle Fläche am günstigsten ist.

Ein positives Nachbild ist, wie ein Nachbild überhaupt, »ein von uns unabhängiger Gegenstand, wie alle räumlichen Gegenstände auch«[2]). In der Auffassung ist das »Nachgebilde« eine räumliche Gesichtsvorstellung. Diese läßt sich hinsichtlich ihrer räumlichen Eigenschaften und hinsichtlich der sie zusammensetzenden Elemente betrachten. Für die Lehre vom Lichtempfinden interessieren die räumlichen Eigenschaften nur, insofern sie vielleicht durch die Lichtempfindungen bedingt sind[3]), und unter den Elementen der räumlichen Gesichtsvorstellung nur die Lichtempfindungen selbst.

Die Größe der Nachbilder beschrieb, wie erwähnt, schon Goethe als mit ihrer Helligkeit abnehmend, und er glaubte, in den heute als Irradiationserscheinungen beschriebenen Tatsachen etwas Analoges zu sehen. Bei der Lokalisierung von negativen Nachbildern hat man, wie Mayerhausen[4]) zeigte, anscheinend die Tendenz, das Nachbild auf eine etwa 2 m entfernte, senkrecht stehende Ebene zu lokalisieren[5]); hierdurch wird, wahrscheinlich dem Emmertschen Gesetz[6]) entsprechend, die Größenauffassung der Nachbilder beeinflußt. Nur

---

[1]) Helmholtz, Handb. d. Physiolog. Optik², S. 502.

[2]) Wirth, a. a. O. S. 488.

[3]) Vgl. zu dieser Frage: Hoppe, Studie zur Erklärung der Scheinbewegungen, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg., Bd. VII (1894), S. 29 (nach Hoppe dauert das Nachbild um so kürzere Zeit, je kleiner das Reizfeld ist) und Klein, Die deformierenden Größenschwankungen der α-Nachbilder, Engelmanns Arch. f. Physiol. (1908), Supplementband S. 219—240.

[4]) Arch. f. Ophthalmol., Bd. XXIX, 2, S. 28 u. f.

[5]) Mit seiner Arbeit bestätigte Mayerhausen eine Vermutung von Zehender: Nachträgliche Bemerkungen . . ., Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde, Bd. XIX (1881), S. 452/453.

[6]) Nach dem Emmertschen Gesetz ist die Größe eines (negativen) Nachbildes in der Weise bestimmt, daß seine lineare Größe gleich ist dem Produkt aus der Reizfläche und dem Verhältnis des Abstandes zwischen Auge und Reizfläche zu dem Abstande zwischen Auge und Projektionsfläche des Nachbildes. Das gilt nach Emmerts Versuchen gleichviel, ob während der Entwickelung des Nachbildes das Auge zeitweise geschlossen wurde oder nicht. (Liegt die Projektionsfläche innerhalb des Nahepunktes des Auges, so wird das Nachbild undeutlich.) — Emmert, Größenverhältnisse der [sc. negativen] Nachbilder, (1881) Klin. Monatsbl. f. Augenheilk., herausgegeben von Zehender, Bd. XIX.

durch quantitative Untersuchungen wird sich bestimmen lassen, ob Helligkeit und Größe eines Nachbildes in funktioneller Beziehung stehen, und ob etwa für solche Funktionen Analogien gefunden werden können. Einer solchen Untersuchung wird aber zweckmäßig eine Orientierung über die Helligkeit der Nachbilder überhaupt vorausgehen.

Die Lichtempfindungen lassen sich nach drei veränderlichen Bestimmungen unterscheiden: »1. nach der Qualität der Farbe oder dem Farbenton, 2. nach der Sättigung der Farbe oder dem Farbengrad und 3. nach der Lichtintensität oder der Stärke der Empfindung«[1]), und wie manche heute bekannten Tatsachen der physiologischen Psychologie, z. B. die Kontrasterscheinungen, zeigen, ist es zweckmäßig, sie nach diesen Bestimmungen gesondert zu betrachten. Dabei ist es für die Kenntnis des Lichtempfindens in erster Linie wichtig, den Verlauf einer einzelnen Lichtempfindung zu erforschen, und, weil sich dieser Verlauf selbst nicht beobachten läßt, sind die Lichtempfindungen hinsichtlich ihrer einzelnen Bestimmungen in den verschiedenen Zeitpunkten ihres Verlaufes zu untersuchen. Aber auch dann läßt sich eine Lichtempfindung nicht direkt untersuchen; beobachtet wird nur eine räumliche Gesichtsvorstellung, in welche alle während der Entstehung dieser Vorstellung ausgelösten Lichtempfindungen eingehen. Wenn für zwei Gesichtsvorstellungen die Gesamtheit der bis zu einem bestimmten und der bis zum nächstfolgenden Zeitpunkte in sie eingehenden Lichtempfindungen festgestellt wurde, läßt sich auf die im letzteren Falle neu eingehende Lichtempfindung schließen usf.[2]). Dieser Weg zur Analyse des Lichtempfindens ist indessen für Untersuchungen von positiven Nachbildern seiner Schwierigkeit wegen noch nicht angezeigt. Man begnügt sich, der primären, direkt durch den Reiz ausgelösten Phase die Phase des positiven Nachbildes gegenüber zu stellen; sie beide als Bewußtseinsinhalte sind zwei im gewöhnlichen Vorstellungsverlauf

[1]) Wundt, Physiol. Psychol.[5], Bd. II, S. 139.

[2]) Solche Untersuchungen wurden z. B. von Buechner über den Anstieg der Helligkeitserregung (Wundt, Psychol. Studien, Bd. II, S. 1—29), von Berliner über den Anstieg der Farbenerregung (Wundt, Psychol. Studien, Bd. III, S. 91—155) und von Wirth über den Verlauf der negativen Nachbilder (Wundt, Philos. Studien, Bd. XVI, S. 465—567, Bd. XVII, S. 311—430 und Bd. XVIII, S. 563—686) durchgeführt.

ganz unwillkürlich resultierende Gesamtvorstellungen. Ob es besonders bei der Nachbildbetrachtung zur Bildung von einer Reihe von Einzelvorstellungen kommt, die man für sich zu betrachten wenigstens vermag, darf zunächst dahingestellt bleiben; denn durch eben die beiden Gesamtvorstellungen scheint der ganze Verlauf des Lichtempfindens hauptsächlich charakterisiert zu sein. Es ist also zunächst für die beiden Phasen des Lichtempfindens in Hinsicht auf dessen drei Bestimmungen nach einer funktionellen Beziehung zu forschen.

Erst weitere Untersuchungen hätten den ganzen Vorgang des Lichtempfindens im einzelnen zu analysieren, insbesondere zu eruieren, ob alle Punkte seines Verlaufes in funktionellen Beziehungen stehen, darnach wäre festzustellen, durch welche Faktoren solche funktionelle Beziehungen noch beeinflußt werden können. Bevor die zunächst zu fordernde Orientierung über eine funktionelle Beziehung zwischen primärem Helligkeitseindruck und positivem Nachbild vollständig gewonnen ist, müssen diese weiteren Fragen dahingestellt bleiben. Extreme Bedingungen, die einen solchen Faktor vorwalten lassen, sind also zu vermeiden, damit nicht nur der besondere Einfluß gerade einzelner Faktoren untersucht wird. Beispielsweise ändern sich die Erscheinungen, je nach der Stelle der Netzhaut, die gereizt wird; gerade diese Unterschiede sind besonders eingehend untersucht worden, um auf entsprechende Unterschiede in der Funktionsweise von Stäbchen und Zäpfchen in der Netzhaut schließen zu können, denn diese lichtperzipierenden Nervenendapparate sind in verschiedenen Netzhautstellen ungleichmäßig verteilt[1]). Auf diese, wie auch auf entsprechende Fragen nach der Wirksamkeit anderer Faktoren werden vermutlich erst quantitative Analysen die entscheidende Antwort erbringen; und es wird solchen speziellen Untersuchungen zweckmäßig eine Orientierung über den allgemeinen Verlauf der Erscheinungen vorausgehen.

---

[1]) Daß die Nachbilderscheinungen in anderer Weise verlaufen, wenn die Reize auf periphere Netzhautpartien als wenn sie auf zentrale gewirkt hatten, beobachteten schon Purkinje und Aubert (vgl. Helmholtz, physiol. Opt.[2], S. 516); die neuesten hierher gehörenden Nachbilduntersuchungen veröffentlichten I. v. Kries in der Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorg., Bd. XXIX (1902), S. 81 u. f. und Heß in Pflüg. Arch., Bd. CI (1904), S. 226 u. f.; vgl. hierzu auch Cords und v. Brücke, Über die Geschwindigkeit des Bewegungsnachbildes, Pflüg. Arch., Bd. CXIX (1907), S. 54.

Über die funktionelle Beziehung des positiven Nachbildes zum vorhergehenden Helligkeitseindruck läßt sich heute, hinsichtlich des Farbentons, mit Wundt vermuten, daß ein positives Nachbild stets dem primären Helligkeitseindruck gleichfarbig ist und nur durch (Simultan-) Kontrast gegenfarbig werden kann, hinsichtlich des Farbengrades, daß ein positives Nachbild blasser ist, als der primäre Helligkeitseindruck. Es ist zu erwarten, daß der strenge experimentelle Nachweis für diese Auffassung durch quantitative Nachbilduntersuchungen erbracht werden wird, ähnlich wie für die Kontrasterscheinungen die verschiedenen, stets, aber in veränderlichem Grade, wirksamen Faktoren durch quantitative Analyse eruiert wurden. Über die Bedeutung des primären Helligkeitseindrucks für den Verlauf der Nachbilderscheinung bemerkte Goethe[1]), für die verschiedene Dauer des Eindruckes komme besonders die Energie in Betracht, womit eine Lichtwirkung das Auge trifft, und Aubert, sie habe »einen eigentümlichen nicht einfachen Einfluß auf die Dauer des Nachbildes«[2]), Helmholtz fand: »je größer . . . . die Intensität des primären Lichtes ist, desto heller ist das positive Nachbild, und desto länger dauert es«[3]).

Schon Goethe hatte es für nützlich gehalten, einer Betrachtung der Nachbilderscheinungen (wie auch des übrigen Lichtempfindens) die Untersuchung ihrer Helligkeitsverhältnisse zugrunde zu legen. In seiner quantitativen Analyse der negativen Nachbilder zeigte Wirth, daß es sich wirklich empfiehlt, bei einer solchen Untersuchung von der Analyse des Helligkeitsempfindens auszugehen[4]). Es ergibt sich demnach als erste Aufgabe, nach einer funktionellen Beziehung zwischen dem primären Helligkeitseindruck und dem ihm folgenden positiven Nachbilde zu forschen.

Eine solche, der Methode nach quantitative, Analyse fehlte bisher. Derartige Untersuchungen lassen sich vorderhand überhaupt nur mit einem geringen Grade von Genauigkeit machen. Einen wie starken Einfluß bei den verschiedenen Versuchen die Disposition des Be-

[1]) a. a. O. II, 1, § 24.

[2]) Moleschotts Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen und der Tiere, Bd. V (1858), S. 314.

[3]) Helmholtz, Physiol. Opt.[2], S. 503.

[4]) Wirth ist eben in seinen oben zitierten Arbeiten mit dem besten Erfolge so vorgegangen.

obachters, also seine Frische, sein anfänglicher Adaptationszustand usw. hat, läßt sich bis jetzt noch nicht bewerten. Nur mittels vieler Versuche unter den gleichen Bedingungen läßt sich mit Wahrscheinlichkeit feststellen, welcher Art bei einer durchschnittlichen Disposition die gesuchten Beziehungen sein werden. Also kann eine etwa gefundene Gesetzmäßigkeit für das Verhältnis der Reizstärke zu einer dem entsprechenden Nachbilde gleich hell geschätzten Vergleichsreizstärke nur annähernde Gültigkeit haben. Eine derartige quantitative Analyse hat wohl ihren Hauptwert darin, daß sich auf die einzelnen das Nachbild bedingenden Faktoren auch da sicher schließen lassen wird, wo deren Wirken ohne sie nur vermutet werden konnte. Erstes Ziel dieser quantitativen Analyse ist es also, einen Beitrag zur qualitativen Kenntnis der Nachbilder zu geben. Damit ist schon einem Einwand begegnet, den Bosscha gegen die Inangriffnahme quantitativer Untersuchungen machte: man sollte mit ihnen nicht beginnen, ehe die qualitativen Eigenschaften der Erscheinungen genau festgestellt sind[1]). Freilich ist es heute auch vollkommen bekannt, unter welchen Bedingungen sich das positive Nachbild am besten beobachten läßt, und wie es da erscheint.

Im Goetheschen Fundamentalversuch zeigt sich, daß man ein Erscheinen von positiven Nachbildern am leichtesten in einer dunklen Umgebung nach der Darbietung eines hellen Feldes erlebt. Helmholtz fand zudem, daß nach ungefähr $^1/_3$ Sek. dauernden Reizen das positive Nachbild am stärksten erscheint[2]), und daß man »sorgfältig jede Bewegung des Auges und jede heftigere Bewegung des Körpers vermeiden« muß, »um die positiven Nachbilder recht schön zu haben«[3]). 1884 beantworteten Vintschgau und Lustig die Frage: »wieviel Zeit verstreicht von dem Augenblicke, in welchem ein momentanes Licht auf die Netzhaut einwirkt, bis zu jenem, in welchem das positive Nachbild hinreichend deutlich geworden ist, um zum Bewußtsein zu

---

1) Bosscha, Primäre, sekundäre und tertiäre Netzhautbilder nach momentanen Lichteindrücken, Arch. f. Ophthalm. (1894), Bd. XL, Heft 1. In der Geschichte unserer Kenntnis der Nachbilder unterscheidet Bosscha drei Perioden: 1. Periode der allgemeinen Beobachtungen (Ptolemäus, Newton...); 2. Periode der Messungen (Senger, Plateau, Charpentier...); 3. Periode des genaueren Studiums der Erscheinungen; diese dritte Periode beginne mit Aubert, sie hätte der zweiten Periode vorausgehen sollen.

2) Helmholtz, Physiol. Opt.², S. 503.

3) a. a. O. S. 504.

gelangen?« Sie fanden im Mittel 272 σ[1]). 1891 entdeckte Heß, daß ein positives Nachbild dem Eindruck eines kurzdauernden Lichtreizes nicht direkt folgt, sondern von ihm durch eine dunkle Phase oder ein negatives Nachbild von etwas weniger als $^1/_3$ Sek. Dauer getrennt ist[2]). In seinen späteren Untersuchungen hat er diese Phasenverhältnisse eingehend studiert, und er fand, daß dem Lichteindruck selbst, den er die erste Phase nennt, zunächst eine ganz kurze negative und eine ganz kurze positive Phase folgen und erst dann die $^1/_3$ Sek. dauernde dunkle oder negative Phase, die dem positiven Nachbild vorausgeht. Die ganz kurze positive Phase ist das schon von Purkinje beschriebene und nach ihm benannte Purkinjesche positive Nachbild. Weil das andere positive Nachbild erst von Heß in seinen Phasenverhältnissen untersucht und beschrieben wurde, nannte man es manchmal nach ihm das Heßsche positive Nachbild. Da aber die ursprüngliche Bezeichnung »positives Nachbild« nichts anderes bedeuten kann, soll sie mit Wundt im Folgenden beibehalten werden. Heß selbst benannte die von ihm beobachteten Phasen nach ihrer Reihenfolge; das positive Nachbild war demnach bei ihm die fünfte Phase; er beschrieb sie als positiv und weniger hell als die dritte Phase (die ihrerseits weniger hell als die erste Phase sei) und als der ersten Phase gleichfarbig; der fünften Phase folgend sah er unter günstigen Umständen noch eine sechste negative Phase[3]). 1894 schätzte Bosscha ganz ungefähr die Helligkeit des positiven Nachbildes, das er als tertiäres Bild dem Purkinjeschen Nachbilde als sekundärem Bilde und dem Lichteindruck selbst als dem primären Bilde gegenüberstellte: »Nimmt man die Lichtstärke

---

[1]) Pflüg. Arch., Bd. XXXIII, S. 494, S. 508.

[2]) Heß, Pflüg. Arch., Bd. XLIX (1891), S. 190.

[3]) »Wirkt auf das Sehorgan ein kurzdauernder Lichtreiz ein, so wird durch denselben zunächst eine Lichtempfindung hervorgerufen, welche nach dem Aufhören des Reizes in fast unmeßbar kurzer Zeit abklingt. Nach diesem primären Lichteindrucke wird bei günstigen Versuchsbedingungen ein negatives Nachbild wahrgenommen, dessen Dauer durchschnittlich etwas weniger als $^1/_3$ Sekunde beträgt. Auf dieses negative Nachbild folgt dann rasch ein positives Nachbild, dessen Dauer von der Stärke des primären Reizes und dem jeweiligen Zustande des Auges abhängt, und welches in der Regel durch mehrere Sekunden in allmählich abnehmender Stärke wahrgenommen werden kann. Nicht selten nimmt man nach diesem positiven auch ein zweites negatives Nachbild wahr.« Heß, Untersuch. über d. nach kurzdauernder Reiz. d. Sehorgans auftr. Nachbilder, Pflüg. Arch. (1891), Bd. XLIX, S. 207. Arch.

des primären Bildes als 100 an, dann würde ich die des sekundären auf 80, die des tertiären auf 10 schätzen«[1]).

1902 faßte Martius als erster exakte Feststellungen über das zeitliche Auftreten von Nachbildern systematisch zusammen; er fand: »daß in weiten Grenzen sowohl die Dauer der positiven Nachbilder, wie die zwischen ihrem Eintreten und dem Aufhören des Reizes verstreichende Zeit mit der Reizdauer zunimmt. Dauern die Reize über mehrere Sekunden an, so tritt wieder eine Verkürzung, sowohl der Nachbilder selbst, wie dieser Zwischenzeit ein. Bei stärkeren und längeren Reizen wiederholen sich die Nachbilder mehrmals, indem zugleich ihre Dauer abnimmt, während die Pausen zunehmen. Was zuerst von den positiven Nachbildern nach kurzer Reizung der Netzhaut festgestellt ist, daß das positive Nachbild von dem Ende des Reizes zeitlich durch eine Pause getrennt ist, gilt allgemein für alle Reize«[2]). 1909 fanden Dittler und Eisenmeier, daß zwischen der von Heß beobachteten ersten und zweiten Phase: »zuerst ein sehr kurzes Intervall (etwa $^1/_{25}$ Sek. lang) und ihm folgend eine helle, bei farbigem Reizlicht diesem gleichgefärbte Phase«[3]) beobachtet werden könne. Die zuletzt genannten Beobachtungen wurden zumeist nicht mit ruhendem Lichtreiz gemacht, mit einem Reize also, der auf eine bestimmte Retinastelle wirkt und dann hier an einer einzelnen Stelle die Erscheinungen einander sich folgen läßt, sondern mit bewegtem Lichtreiz, d. i. mit einem Reize, der nacheinander eine Reihe von Netzhautstellen trifft, so daß die im einzelnen Erregungsvorgang einander folgenden Erscheinungen nebeneinander sichtbar werden. Bei Beobachtungen mit bewegtem Lichtreiz hatten schon

---

f. Ophthalm., Bd. XL (1894), S. 259; Bd. XLIV (1897), S. 445; Bd. LI (1900), S. 225; Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXVII (1902), S. 1; Pflüg. Arch., Bd. XCV (1903), S. 1; Bd. CI (1904), S. 226.

[1]) Bosscha, Primäre, sekundäre und tertiäre Netzhautbilder nach momentanen Lichteindrücken, Arch. f. Ophthalm., Bd. XL (1894), S. 35. Auf Grund seiner Versuche bemerkt er ferner (S. 37/38), das tertiäre Bild werde um so intensiver und dauere um so länger, je länger die Beleuchtungsdauer sei, und mit wachsender Lichtstärke nehme die Nachbilddauer ein wenig, mit wachsender Beleuchtungsdauer erheblich zu.

[2]) Martius, Über die Dauer der Lichtempfindungen, Beitr. z. Psychol. u. Philos., Bd. I, Heft 3 (1902), S. 326.

[3]) Dittler und Eisenmeier, Über das positive Nachbild nach kurzdauernder Reizung des Sehorgans mittels bewegter Lichtquelle (1909), Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. CXXVI, S. 642.

1872 Young[1]) und Davis[2]) gefunden, daß ein Nachbild mehrere positive Phasen haben kann. Weitere derartige Untersuchungen machten besonders Bidwell[3]), Mc. Dougall[4]) und Martius[5]); Mc. Dougall beobachtete dabei bis zu 20 helle Streifen als positives Nachbild.

Die Methode mit bewegtem Lichtreiz hilft Erscheinungen entdecken, die bei Beobachtung mit ruhendem Lichtreiz nicht in ihren Einzelheiten aufgefaßt werden können, weil ein Nebeneinander von Nachbildphasen sich leichter gesondert auffassen läßt, als ein Nacheinander. Soll indes, was eigentlich in Frage kommt: die Erscheinungsfolge in einem einzelnen Erregungsvorgang untersucht werden, so ist zunächst nur die Methode mit ruhendem Lichtreiz von entscheidendem Werte, denn sobald mehrere Retinastellen nebeneinander gereizt werden, beeinflussen die einzelnen Erregungsvorgänge einander (besonders durch Kontrastwirkung); ob diese Beeinflussung so geringfügig ist, daß von ihr abgesehen werden darf, müßte erst festgestellt werden, indem man die mittels beider Nachbildmethoden gefundenen Ergebnisse vergleicht. Das ist bisher nicht geschehen.

Den Farbenton der Nachbilder haben besonders Munck[6]) und Hamaker[7]) systematisch untersucht. Man nimmt heute an, daß ein positives Nachbild seinem Reize in der Regel gleichfarbig ist; und wenn positive komplementärfarbige Nachbilder zur Beobachtung kommen, ist das Erscheinen des positiven Nachbildes nach Martius[8])

1) Recurrent Vision, American Journal of Science and Art f. April 1872, abgedruckt in der Philosophical Magazine and Journal of Science, Bd. XLIII, S. 343—345.

2) A. S. Davis, On recurrent Vision, Phil. Mag. (4), Bd. XLIV, S. 526 und Ocular After-Images and Lightning, Nature, Bd. XXXII, S. 126.

3) Bidwell, On the recurrent images following visual impressions. Proc. of the roy. Soc., Bd. LVI, Nr. 337, S. 132—145.

4) Mc. Dougall, The sensation exited by a single momentary stimulation of the eye, Brit. Journ. of Psychol., Bd. I (1904—1905) S. 301—326.

5) Martius, Über die Dauer der Lichtempfindungen, Beitr. z. Psychol. u. Philos., Bd. I, S. 301—326.

6) Munck, Die Erscheinungen bei kurzer Reizung des Sehorganes; Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXIII, S. 60 u. f.

7) Hamaker, Nachbilder nach momentaner Helligkeit; Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXI (1899), S. 3 u. f.

8) Beitr. z. Psychol. und Philos., Bd. I (1896), S. 35. Martius übernahm in seiner Erklärung die Meinung von Helmholtz (Martius, Handb. d. physiol. Opt.[2], S. 528). Er müßte dabei voraussetzen, daß in den beobachteten Fällen eines komplementärfarbenen positiven Nachbildes entweder der zeitliche Verlauf vom positiven und vom negativen Nachbilde zusammenfallen, oder daß in den betreffenden Fällen vor oder

mit dem Auftreten eines negativen Nachbildes, nach Wundt[1]) mit Kontrasterscheinungen kompliziert. Der Farbenton des positiven Nachbildes ist stets blasser als der des Reizes. Da in der vorliegenden Arbeit die Helligkeit positiver Nachbilder untersucht werden soll, und demgemäß, zunächst wenigstens, weiße Reize zur Darbietung kommen müssen, dürfen eingehendere Fragen nach dem Farbenton positiver Nachbilder vorerst dahingestellt bleiben.

Es ergibt sich aus den einleitenden Bemerkungen, daß für eine quantitative Analyse der Helligkeit positiver Nachbilder am günstigsten ungefähr $^1/_3$ Sek. dauernde helle Lichtreize auf dunklem Grunde sind, daß die Beobachtungen bei starrer Fixation des Auges gemacht werden müssen, und daß, zunächst wenigstens, die Methode mit ruhendem Lichtreiz zu wählen ist. Die günstigsten Versuchsbedingungen müssen gewählt werden. Denn ihrer »Flüchtigkeit« wegen sind die positiven Nachbilder so schwierig zu beobachten, daß Wundt noch 1902 annehmen mußte, von ihrer quantitativen Analyse sei überhaupt abzusehen[2]). Inzwischen wurden aber im Leipziger psychologischen Institut während der Arbeiten von Buechner und Berliner Untersuchungsweisen ausgebildet, die es ermöglichten, das Problem in Angriff zu nehmen.

Über die Erscheinungsweise des positiven Nachbildes genügt es zu wissen:

> Das positive Nachbild ist von dem vorausgehenden Helligkeitseindruck durch eine (nach Heß ungefähr $^1/_3$ Sek. dauernde) dunkle Phase getrennt, dieser dunklen können noch bedeutend kürzere helle und dunkle Phasen vorausgehen. Das positive Nachbild erscheint dem Reize gleichartig, d. h. die hellen Partien des Reizes erscheinen hell, die dunklen dunkel. Der Farbenton eines positiven Nachbildes ist in der Regel dem des Reizes gleich.

---

nach dem positiven komplementären ein positives gleichfarbiges oder ein komplementäres negatives Nachbild oder mehr dergleichen mitsamt den entsprechenden Übergangserscheinungen sich beobachten ließen. Die erste der beiden Voraussetzungen ist wahrscheinlich unberechtigt, denn soweit dies bisher bekannt wurde, ist die funktionelle Beziehung von negativen und positiven Nachbildern zu ihren Reizen eine durchaus verschiedene, die zweite Voraussetzung läßt sich durch das bisher bekannte Beobachtungsmaterial, trotz dessen Reichhaltigkeit, nicht ausreichend begründen.

[1]) Wundt, Physiol. Psychol.[5], Bd. II, S. 193 u. f.

[2]) Wundt, Physiol. Psychol.[5], Bd. II, S. 198.

II. Besprechung der Aufgabe und ihrer Lösungsmöglichkeit.

Der kurze Überblick über die vorliegenden Untersuchungen von Nachbilderscheinungen zeigt, welche Aufgabe zunächst in Angriff zu nehmen ist: hinsichtlich ihrer Helligkeit nämlich müssen die positiven Nachbilder auf eine Abhängigkeit von den sie auslösenden Reizen hin untersucht werden. Durch die Aufgabestellung ist schon das Prinzip der Versuchsweise bestimmt: Es müssen unter sonst gleichbleibenden Versuchsbedingungen durch Lichtreize verschiedener Helligkeit positive Nachbilder ausgelöst werden können, und ihre Helligkeit muß gemessen werden; es muß also neben der Erscheinung des positiven Nachbildes eine Vergleichshelligkeit dargeboten werden[1]). Ein Vergleichsreiz soll als Maß für die Nachbildhelligkeit dienen. Der absolute Wert dieses Maßes kommt nicht in Frage, wesentlich ist nur das Verhältnis der durch ihn definierten Nachbildhelligkeit zur Helligkeit des primären Lichteindruckes. Damit die Maße: Vergleichsreiz- und Primärreizintensität dies Verhältnis ausdrücken können, müssen beide Reize auf gleich empfindliche Netzhautstellen gewirkt haben (oder es müßte sich dies nach einer Korrektion auf Grund des genau bekannten Empfindlichkeitsverhältnisses beider Netzhautstellen annehmen lassen). Für einen regelmäßigen Verlauf der Nachbilderscheinungen hat sich als notwendig ergeben, daß jede Beobachtung bei durchweg starrer Fixation gemacht wird. Dieser Forderung läßt sich um so leichter gerecht werden als für die Lichtreize eine kurze Dauer (etwa $^1/_3$ Sek.) ohnedies am besten ist[2]). Fixiert

---

[1]) Vgl. Martius, Beitr. z. Psychol. u. Philos., Bd. I (1896), Heft 1, S. 92: »Die Helligkeit der Nachbilder kann nicht gemessen werden, weil sie nicht isoliert zur Erscheinung zu bringen und zu vergleichen sind. Wir haben freilich anzunehmen, daß die Nachbilder im vollständig verdunkelten Gesichtsfeld ihre eigene Helligkeit zeigen. Es dürfte nicht leicht sein, diese ohne Störung ihrer selbst mit objektiven Helligkeiten zu vergleichen. Immerhin könnte es versucht werden. Daß die Helligkeit der Nachbilder im dunkeln Gesichtsfeld ihrem absoluten Werte nach eine andere ist, als bei Betrachtung irgendeiner leuchtenden Fläche, ist in jeder Hinsicht selbstverständlich und leicht zu bemerken.« — Die Vergleichung der subjektiven Helligkeit eines negativen Nachbildes mit einer objektiven Helligkeit beschrieb Hering schon 1878 in d. 1—3 Mitteilung zur Lehre vom Lichtsinn (Wien), § 6; 1909 schilderte er »Eine Methode zur Beobachtung und Zeitbestimmung des ersten positiven Nachbildes kleiner bewegter Objekte«; Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. CXXVI, S. 604 u. f.

[2]) Vgl. o. S. 169.

werden die Augen am leichtesten durch starres Richten des Blickes auf einen mäßig hellen, rötlichen[1]), kleinen Kreis, der unter einem Gesichtswinkel von nur wenigen Winkelminuten gesehen wird. Neben diesem Kreis, dem »Fixierpunkt *F*« (s. Fig. 3) läßt sich der Reiz so darbieten, daß er gerade auf den parafovealen Teil der Netzhaut wirkt[2]). Dann läßt sich diesem Reiz, dem Primärreiz gegenüber auf der anderen Seite des Fixierpunktes der Vergleichsreiz zu der Zeit wo das Nachbild erscheint so darbieten, daß er auf eine ebenso empfindliche Netzhautstelle wirkt wie der Primärreiz. Im Gegensatz zu dem Primärreiz heiße der Vergleichsreiz Sekundärreiz.

Nicht nur ein in bestimmter Weise ausgelöstes positives Nachbild soll auf funktionelle Abhängigkeit von seinem Reize hin untersucht werden; sondern um diese zu erkennen, müssen die Nachbilder verschieden starker Reize untereinander verglichen werden. Die Maße für Nachbildhelligkeiten müssen diese stets in gleicher Weise charakterisieren.

Es wurde schon in der Einleitung bemerkt, daß nach dem Erleben der Erscheinung eines positiven Nachbildes sich unwillkürlich eine Gesamtvorstellung bildet. Die dabei vorgestellte Helligkeit kommt der stärksten der in sie eingehenden Helligkeitsempfindungen zum mindesten sehr nahe. Diese Erfahrungstatsache führt auf den Gedanken, daß die verschiedenen Nachbildhelligkeiten sich in einheitlicher Weise messen lassen, indem ihre Maße, die Sekundärreize, stets dann dargeboten werden, wann die Nachbilder am hellsten erscheinen. Für die zu untersuchenden Nachbilder wäre also zunächst

[1]) Nach J. von Kries, Über die Wirkung kurzdauernder Reize auf das Sehorgan, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXV, S. 241.

[2]) Damit ist der oben S. 167 aufgestellten Forderung Rechnung getragen, daß nicht der Erscheinungsverlauf in einer Netzhautregion, die sich besonders durch Stäbchen oder Zäpfchen auszeichnet, untersucht wird, und er wird in einer besonders empfindlichen, also für die experimentelle Analyse sehr geeigneten Stelle der Netzhaut untersucht. Vgl. Stigler, Pflüg. Arch., Bd. CXXIII (1908), S. 183. Stigler bestätigte experimentell die (etwas ungenau zitierte) Vermutung Berliners: »Neuerdings hat Heß speziell für die zeitlichen Verhältnisse gezeigt, daß der Erregungsverlauf in der Fovea ein trägerer ist als außerhalb derselben. Am leichtesten spricht offenbar derjenige Teil der Netzhaut an, der die Zentralgrube ringförmig und ziemlich scharf umgrenzt.... Würde man ein größeres Feld vollkommen momentan eine entsprechende Zeit exponieren, so würde man wahrscheinlich einen Ring oder wenigstens einen ausgesparten Fleck erblicken, welcher der eigenen Fovea entspricht.« (Wundt, Psychol. Stud., Bd. III (1907), S. 131/132.)

dieser Zeitpunkt festzustellen. Die weiteren Untersuchungen fußen somit auf der Voraussetzung, daß es wirklich gelingen wird, die Sekundärreize stets im Zeitpunkte des hellsten Erscheinens eines Nachbildes zu geben, und daß die Auffassung der Sekundärreizhelligkeiten unabhängig ist von dem Intervall zwischen Primärreiz und Sekundärreiz; oder es müßte sich herausstellen, daß die Helligkeitsmessung der positiven Nachbilder unabhängig davon ist, ob der Sekundärreiz wirklich in dem Zeitpunkt dargeboten wird, wo das Nachbild am hellsten erscheint, oder so viel früher oder später, daß in den verschiedenen Nachbildmessungen die Sekundärreize stets die nämliche Zeit nach dem Primärreiz dargeboten werden dürfen.

Die Versuchsbedingungen sind, wie schon in der Einleitung bemerkt wurde[1]), im übrigen so zu wählen, daß erstens die positiven Nachbilder sich möglichst günstig beobachten lassen, und daß zweitens vor Lösung der allgemeinen Aufgabe keine speziellen Versuchsbedingungen eingeführt werden. Dazu ist hier im einzelnen nur noch zu bemerken: Die Lichtreize sollen in einer Form dargeboten werden, daß sie sich möglichst leicht hinsichtlich ihrer Helligkeit auffassen lassen. Würde es sich um nur einen Reiz handeln, so wäre wahrscheinlich die Form eines Kreises am geeignetsten. Systematische Untersuchungen darüber anzustellen, welche Form des Reizes die geeignetste ist, wäre eine sehr interessante Aufgabe für sich. Diese Aufgabe indes lediglich für die hier geplanten Versuche in Angriff zu nehmen, würde sich kaum verlohnt haben, da dann erst noch weitere Untersuchungen über die Allgemeingültigkeit der erhaltenen Ergebnisse hätten unterrichten müssen, und weil eine verhältnismäßig geringe Zahl von Vorversuchen zu einer Form (vgl. Fig. 3) geführt hat, die in der Folge befriedigte.

Eine weitere Diskussion der ersten Aufgabestellung erübrigt sich, da es sich nur noch um Fragen handelt, die empirisch durch Vorversuche zu lösen waren.

Die Lösung der gestellten Aufgabe bringt zur quantitativen Analyse der Helligkeit positiver Nachbilder nur den ersten, aber den grundlegenden Beitrag. Weitere Untersuchungen müssen den Ver-

---

[1]) Vgl. o. S. 173.

lauf der Nachbilderscheinungen genauer kennen lehren und zeigen, in welcher funktionellen Beziehung der Helligkeitswert positiver Nachbilder zu den einzelnen Versuchsbedingungen steht, und besonders auch, wie die gefundenen Gesetzmäßigkeiten sich zu den von Wirth für die negativen Nachbilder gefundenen verhalten.

Die Diskussion der Fragestellung zeigt, daß vor Beginn der eigentlichen Versuchsreihen Vorversuche entscheiden mußten: 1. welcher Punkt im Helligkeitsverlauf der positiven Nachbilder zu wählen sei, 2. welche Reizstärken für die Untersuchung der funktionellen Beziehung vom Helligkeitswert der positiven Nachbilder zum Helligkeitseindruck geeignet sind, und ob die Helligkeit der positiven Nachbilder so genau bestimmt werden kann, daß die eben genannte funktionelle Beziehung sich deutlich erkennen läßt, 3. mußten gelegentlich der Vorversuche Erfahrungen gesammelt werden, welche Versuchsanordnung am geeignetsten ist.

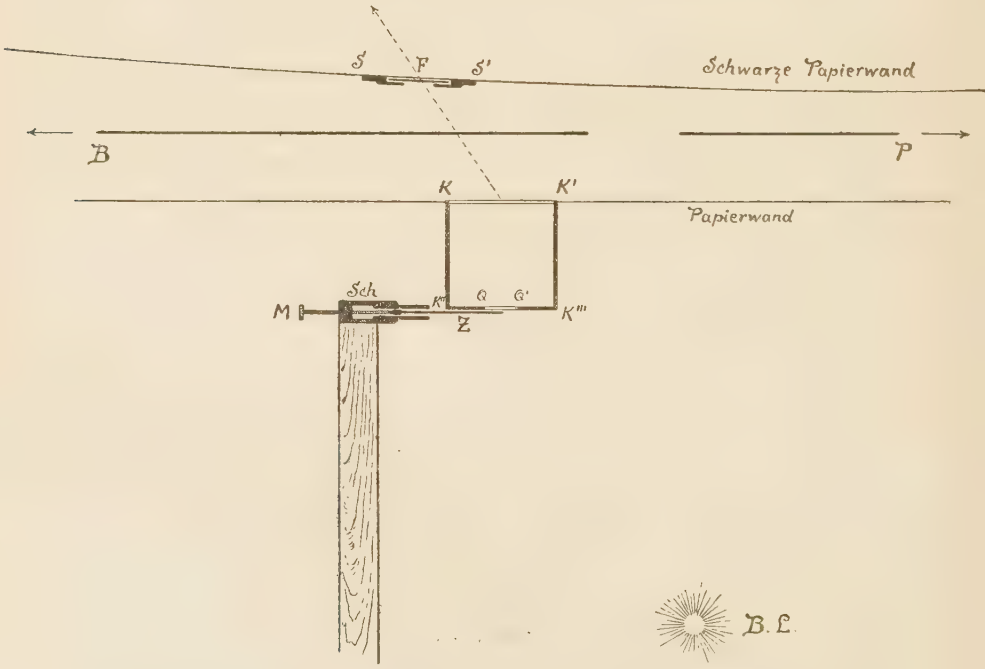
Die Vorversuche führten zu einer fünfmaligen Änderung der ursprünglichen Versuchsanordnung. Auf Grund einer Beschreibung der definitiven Versuchsanordnung lassen sich aber auch die Ergebnisse beurteilen, die schon vor deren Fertigstellung gewonnen waren; sie wurden nämlich sämtlich mittels der definitiven Versuchsanordnung nachgeprüft und bestätigt, und mit ihr wurden alle in dieser Arbeit mitgeteilten Versuchsreihen angestellt. Sie unterscheidet sich von früheren Anordnungen hauptsächlich dadurch, daß erst sie die zur Lösung der gestellten Aufgabe erforderliche schnelle und exakte Variation der Reize möglich macht.

Die Aufgabe für die Herstellung der Versuchsanordnung.

Es sollte im Dunkeln ein in seiner Stärke variierbarer heller Reiz so dargeboten werden, daß er gerade parafoveal gesehen wurde; auch die Expositionszeit des Reizes sollte dabei variierbar sein. Eine zwar variierbare, aber in jedem Fall genau bestimmte Zeit später, wann das positive Nachbild am hellsten erschien, sollte ein zweiter Reiz von gleicher Form, jedoch geringerer Stärke wie der erste dargeboten werden; er sollte auf einen anderen aber gleich empfindlichen Netzhautteil wirken wie der erste, so daß dessen Helligkeitseindruck mit dem Helligkeitsmaximum des positiven Nachbildes verglichen werden konnte. Um nicht Bedingungen einzuführen, die eine gleichmäßige

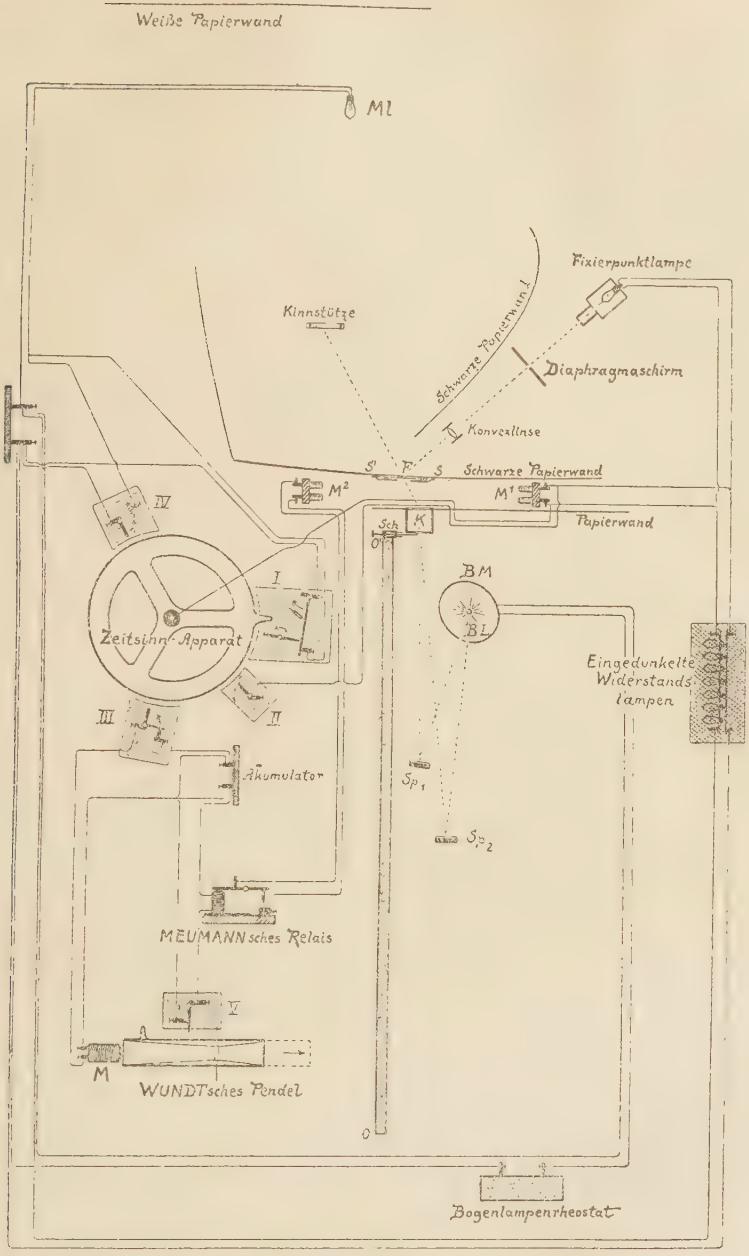
Verwertung der Versuchsergebnisse stören könnten, wie das eine während der Versuchsstunde fortschreitende Dunkeladaptation gewesen wäre, mußte man bei jedem Versuche von der nämlichen Adaptation ausgehen können. Deswegen wurde jedesmal nach der Abdunkelung, wie sie zu jedem Einzelversuche für 11 372 σ nötig war, und während der jeweils ein im Verlauf der ganzen Versuchsstunde stets gleicher Dunkeladaptationsanstieg stattfinden sollte, dem Beobachter eine gleichmäßig beleuchtete Papierfläche dargeboten, und zwar stets für 2 Min. 49 Sek. Das als Adaptationsfläche dienende Papier ist fast schwarz und schwach beleuchtet, so daß vor Beginn einer jeden Abdunkelung der Beobachter eine Helligkeitsadaptation geringen und, wie die Vorversuche lehren, stets des nämlichen Grades erlangte. Die Versuche folgten einander alle drei Minuten.

Einen Überblick über die Versuchsanordnung gewährt am besten eine Skizze über ihre Anwendung während eines Versuches.



Figur 1.

Horizontalabschnitt durch die Versuchsanordnung in Augenhöhe des Beobachters. Maßstab 1 : 7,19.



Figur 2.

Schema der gesamten Versuchsanordnung.

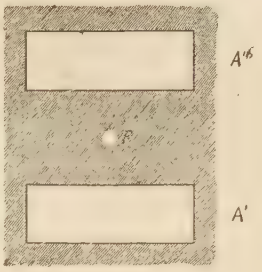
III. Schilderung der Versuchsweise.

(Kurze Skizze der Versuchsanordnung.)

Fig. 1 zeigt einen Horizontalschnitt durch die Versuchsanordnung in Augenhöhe des Beobachters, im Maßstabe 1 : 7,19. Fig. 2 zeigt ein Schema der ganzen Anordnung. Der Beobachter blickt zur Adaptation von der Kinnstütze aus auf die schwarze Papierwand; diese Wand wie auch die seitlichen Papierwände werden von einer Mattglaslampe (*ML* in Fig. 2), die sich schräg hinten über dem Beobachter befindet, gleichmäßig beleuchtet. Eine weiße Papierwand hinter dieser Lampe sorgt für gleichmäßige Lichtverteilung. Der zur Adaptationslampe *ML* führende elektrische Strom wird durch einen Unterbrechungs- und durch einen Schließungskontakt eines Wundtschen Zeitsinnapparates geschickt. Die Stromkreise zu den Haltemagneten des zuerst von Berliner benutzten und beschriebenen Pendeltachistoskops[1]) (M^1 und M^2 in Fig. 2), nach deren Entmagnetisierung in bestimmtem Intervall die Reize dargeboten werden, können mit Hilfe des Zeitsinnapparates (sowie eines Wundtschen Pendels und eines Meumannschen Relais (vgl. Fig. 2) kurz geschlossen werden. Dadurch kann zu genau bestimmten Zeitpunkten zunächst verdunkelt und dann ein Primärreiz gegeben werden, durch dessen Eindruck ein positives Nachbild hervorgerufen wird, und dessen Helligkeitswert zur Zeit seiner stärksten Helligkeit mit dem Eindruck eines in bestimmtem Intervall nach dem Primärreize auftretenden Meßreizes sich vergleichen läßt. Endlich kann nach einer bestimmten Gesamtabdunkelungszeit von 11 372 σ wieder erhellt werden. Soll der Versuch beginnen, so wird durch Auslösung des Arretierhebels der Zeitsinnapparat in Tätigkeit gesetzt; dreht sich das große Rad des Apparates, so werden durch eine am Rade in radialer Richtung vorspringende Nase nacheinander die doppelarmigen Hebel (I—IV) gedreht (vgl. Fig. 2). Durch Drehung von (I) wird der zur Adaptationslampe (*ML*) führende Strom unterbrochen. Der Raum vor dem Beobachter ist dann völlig verdunkelt bis auf den Fixationspunkt *F*. Der erhält vermittels des Diaphragma

[1]) Beschrieben und abgebildet in den Psychol. Stud., Bd. III, Heft 2/3 (1907), S. 98—100.

(im Diaphragmaschirm) und der Konvexlinse sein Licht von der Fixationspunktlampe in Gestalt eines (umgekehrten) reellen Bildes. In den Strahlengang können am Diaphragmaschirm (insbesondere rote) Lichtfilter eingeschaltet werden. Senkrecht über und unter dem Fixationspunkt befinden sich rechtwinklige Ausschnitte, die bei Fixation des Punktes parafoveal gesehen werden; Fig. 3 bildet diese Felder als A' und A'' in natürlicher Größe ab. Durch einen Schieber S kann abwechselnd eines der beiden Felder geöffnet werden. Hat sich der Zeitsinnapparat soweit gedreht, daß (II) von der Radnase berührt wird, so tritt ein Nebenschluß für den zum Magneten M^1 gehenden Strom ein, und der an diesem hängende Anker des großen Berlinerschen Pendels wird losgelassen. Er schwingt hinüber nach M^2 und wird dort festgehalten. Mit dem Berlinerschen Pendel schwingt sein großer schwarzer Papiersektor (BP in Fig. 1) vor den rechteckigen Ausschnitten A' und A'' vorüber. Zunächst läßt der Schieber den unteren Ausschnitt A' offen; in dem schwarzen Papiersektor ist auch ein Sektor-Ausschnitt, der für die erforderliche Dauer der Expositionszeit (von 253 σ) dem Betrachter den Blick auf die Milchglasscheibe KK' erlaubt. Diese Milchglasscheibe wird von der Bogenlampe BL vermittelst des Spiegels Sp_1 beleuchtet; durch Verschiebung dieses Spiegels läßt sich die auf KK' fallende Lichtintensität variieren, so daß die vorkommenden Reizstärken 2,44; 4,66; 6,06; 19,4; 37,9; 101 und 244 MLm[1]) betragen. Während der Expositionszeit durch den Sektorausschnitt des Berlinerschen Pendels erhält der Beobachter den Lichtreiz, durch dessen Helligkeitseindruck das positive Nachbild hervorgerufen werden soll. Hat sich der Zeitsinnapparat soweit gedreht, daß die Radnase den Kontakthebel (III) drehte, so wird der Stromkreis im Magneten (M) des Wundtschen Pendels unterbrochen; das durch den Magneten gehaltene eiserne Pendel schwingt los, und seine Nase dreht den doppelarmigen Hebel (V), so



Figur 3.
Die Reizfelder
in natürlicher Größe.

[1]) MLm = Lumen multipliziert mit dem konstanten Faktor M. Der Koëffizient M ist die Albedo von Magnesiumoxyd. Vgl. die genaue Definition u. S. 187.

daß der Stromkreis im Relaismagneten unterbrochen wird. Infolgedessen fällt der durch ihn gehaltene Relaishammer, und der Stromkreis des Magneten M^2 wird kurz geschlossen. Der Anker am unteren Ende des Berlinerschen Pendels wird also losgelassen und schwingt hinüber nach dem Magneten M^1, von dem er wieder festgehalten wird, da der durch M^1 gehende Strom nur während der Berührung von (I) mit der Radnase kurz geschlossen war. Dabei schwingt der Sektor (BP) wieder vor den Ausschnitten A' und A'' vorbei. Der Schieber S wird zuvor vom Experimentator so eingestellt, daß diesmal der obere Ausschnitt (A') offen ist; im Sektor (BP) befindet sich nun noch ein A'' entsprechender oberer Ausschnitt, der für die erforderliche Dauer der Expositionszeit (von 310 σ) dem Beobachter einen Durchblick auf die Milchglasplatte (KK') gestattet. (KK') ist der obere Teil der Milchglasplatte, die durch den unteren Ausschnitt hindurch während der Expositionszeit des Reizes die Reizfläche abgab; sie soll die Reizfläche darbieten, deren Helligkeitseindruck mit dem Helligkeitswert des Nachbildes verglichen wird. Deswegen soll durch sie eine beträchtlich geringere Lichtmenge hindurchgehen als durch den unteren Teil der Platte; das wird durch eine besondere Blendenvorrichtung bewirkt: Das Licht muß auf seinem Weg zum oberen Teil der Platte eine andere dünne Milchglasplatte QQ' (vgl. Fig. 1) passieren. Beide Platten stehen einander parallel und sind von einem lichtdichten Schacht eingeschlossen. Bevor das Licht auf seinem Wege die erste Milchglasplatte (QQ') trifft, gelangt es durch einen auf dieser Platte befestigten Spalt. Die Breite des Spaltes kann durch eine mittels Mikrometerschraube einstellbare Zunge des Schlitten *Sch* (vgl. Fig. 1) variiert werden. Proportional der Spaltbreite ändert sich die Stärke des Meßreizes. Auf den Spalt wird mittels des Spiegels (Sp_2) von der Bogenlampe durch einen verschieblichen Schlitz ihres Mantels (BM) Licht geworfen. Durch Verschiebung von (II) am Zeitsinnapparat soll das Intervall zwischen dem Auftreten der beiden Reize, des Primärreizes und des Meßreizes, so eingestellt werden, daß inzwischen das positive Nachbild bis zu einem bestimmten Punkte sich entwickelt hat. Nachdem ein Vergleich der beiden Helligkeiten von Nachbild und Meßreiz hat ausgeführt werden können, hat sich das Rad am Zeitsinnapparat soweit gedreht, daß seine Nase (IV) dreht und so wieder einen durch die Adaptationslampe (ML) gehenden Stromkreis schließt;

somit wird die zur Erzeugung der Helladaptation dienende Papierwand wieder beleuchtet. Der Versuch ist nun beendet, und der Experimentator hat nur noch dessen Resultat zu notieren, das Gewicht des Zeitsinnapparats aufzuziehen, die Hebel (I—IV) zurückzudrehen, an zwei Umschaltern die Stromkreise zu wenden, welche durch die Magnete des Berlinerschen sowie des Wundtschen Pendels und des Relaishammers gehen[1]) und das Wundtsche Pendel, wie den Relaishammer an ihre Magnete zu hängen; dann kann zu gegebener Zeit der nächste Versuch beginnen.

IV. Beschreibung der Versuchsanordnung.

Den verschiedenen Maßangaben wurde allgemein das *C. G. S.*-System zugrunde gelegt, und in den Zahlenwerten darf stets die vorletzte der noch angegebenen Dezimalen Anspruch auf Genauigkeit machen. Bisher war dies in psychologischen Arbeiten wohl meist stillschweigend vorausgesetzt. Für 0,001 Zeitsekunde wurde, wie üblich, 1 σ eingesetzt. Nur die photometrischen Angaben bedürfen einer Erläuterung.

Bislang wurden in psychologischen und physiologischen Arbeiten photometrische Angaben entweder umgangen, und es wurde nur die Versuchsanordnung einigermaßen skizziert, um damit ein ungefähres Bild der vorkommenden photometrischen Werte zu geben, oder man machte Angaben über die benutzten Helligkeiten, wenn Helligkeitswerte verglichen werden sollten; dann wurde irgendeine der benutzten Helligkeiten zum Ausgang genommen und für die anderen deren relativer Wert eingesetzt, oder es wurde bei Angaben in absolutem Maße eine in der Praxis gebräuchliche Einheit gewählt, zumeist die Meterkerze (MK). Man verstand dabei unter Meterkerze »die Helligkeit einer weißen Fläche, die von einer Normalkerze aus der Entfernung von 1 m bei senkrecht auffallenden Strahlen beleuchtet wird«. Diese Definition mochte in der Praxis für ziemlich grobe Messungen genügen[2]), sie ist aber mangelhaft und ist auch niemals von einer für die Photometrie maßgebenden Stelle angenommen worden. Ihr erster Fehler ist: sie enthält in ihrer Definition den gar nicht definierten und äußerst schwer zu definierenden Begriff »Weiß«. Absolutes Weiß läßt sich nicht herstellen, und die Albedos weiß genannter Flächen können nach Zoellner[3]) und Sumpner[4]) bis zu 15 % voneinander differieren. (Unter Albedo ist mit Lambert das diffuse Reflexionsvermögen für die Lichtstrahlen bei senkrechtem Einfall verstanden.) Zweitens bestimmt die Definition nicht die Bedeutung des in ihr enthaltenen Be-

1) Der Übersichtlichkeit wegen sind die beiden Umschalter in Fig. 2 nicht eingezeichnet.

2) So fand sie in Brockhaus Konversations-Lexikon Aufnahme, ...[14], Bd. II, S. 663a.

3) Zoellner, Photometrische Untersuchungen (1865), S. 273.

4) Sumpner, Philosoph. Mag. (1893), (5), 35.

griffs »Helligkeit«; infolgedessen sind Helligkeit, Beleuchtung und Licht intensität inmehreren Arbeiten verwechselt worden. Drittens wurde die Meterkerze in den für die Photometrie maßgebenden Kreisen nicht wie in obiger Definition als Helligkeits- sondern als Beleuchtungseinheit angenommen; sie wird erhalten, wenn eine punktförmige Lichtquelle 1 HK ein ebenes 1 m entferntes kleines Flächenstück senkrecht beleuchtet. Termini technici haben nur Wert, wenn sie der Ausdruck für einen ganz bestimmten Begriff sind, sollten daher nie in einem anderen Sinne gebraucht werden. Um Mißverständnisse zu vermeiden, besonders um Verwechslungen von Beleuchtungs- und Helligkeitseinheit vorzubeugen, pflegt heute der Ausdruck »Meterkerze (MK)« überhaupt vermieden zu werden[1]). Als Bezeichnung für die Beleuchtungseinheit gilt 1 Lux (Lx.).

Angaben in einem allgemein bekannten und wohldefinierten Maße sind für experimentelle psychologische Untersuchungen nicht nur wünschenswert, um über beschriebene Versuche sich ein klares Bild machen zu können, sie sind oft für den Wert einer Arbeit entscheidend, damit deren Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Arbeiten verglichen werden können. Zur Erleichterung der Vergleiche haben die Angaben direkt aufzuweisen, was den Psychologen interessiert, nämlich die Stärke und Beschaffenheit des Reizes, der eine Empfindung auslöste, und nach dem diese Empfindung charakterisiert wird. Da in der vorliegenden Arbeit Helligkeitseindrücke untersucht werden sollen, sind die entsprechenden Lichtreizstärken anzugeben[2]). Ein Lichtreiz ist eine Energiemenge leuchtender Strahlen, die eine Entstehung von Lichtempfindungen bewirkt. Die Stärke des Lichtreizes ist bestimmt durch die Energiemenge leuchtender Strahlen, die durch ihre Wirkung auf die Nervenendapparate einer bestimmten Netzhautfläche zur Auslösung einer bestimmten Gruppe von Lichtempfindungen führen.

Nur ein bestimmter Bruchteil der gesamten Energiemenge leuchtender Strahlen, welche eine Lichtquelle ins Auge sendet, führt zur Auslösung einer Lichtempfindung. Dieser Teilbetrag der gesamten Energiemenge interessiert den Psychologen; er heißt jetzt allgemein Lichtstrom, wie ihn zuerst Blondel nannte[3]). Die Einheit des Lichtstromes sollte nach Blondels Ausführungen zum Ausgang für alle photometrischen Maßeinheiten dienen. Aus praktischen Gründen wurde hierzu jedoch die Lichtstärke gewählt, weil deren Einheit sich durch eine Lichtquelle darstellen läßt. Als technisches Lichtmaß ist in Deutschland die Lichtstärke der Hefnerlampe[4]) weitaus am gebräuchlichsten. Die Lichtstärke dieser Lichtquelle heißt Hefnerkerze (= HK). Als Definition für die Einheit des Lichtstromes wurde allgemein angenommen: die von der punktförmigen

[1]) Das fordert z. B. Lommel, Experimental-Physik (1908), S. 472.

[2]) Vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[6], Bd. I, S. 529/530.

[3]) Blondel, Rapport sur les unités photométriques, L'Eclairage électrique, Bd. VIII (1896), S. 341; Zeitschr. f. Beleuchtungswesen, Bd. II (1896), S. 359.

[4]) Veröffentlichung der Physikalisch-technischen Reichsanstalt, Zentralblatt für das Deutsche Reich, 1893, S. 124; Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Bd. XXXII (1893), S. 341.

Lichtquelleneinheit (1 HK) in die Einheit des räumlichen Winkels gesandte Energiemenge leuchtender Strahlen, welche die Auslösung einer Lichtempfindung bewirken können; sie heißt Lumen (= 1 Lm). In der Definition des Lumen ist weder der Abstand der Lichtquelle von der bestrahlten Netzhautfläche, noch die Größe der bestrahlten Netzhautfläche erwähnt. Beide schreiten in gleicher aber umgekehrter Progression fort. Ihr Produkt ist also ein konstanter Faktor. Die Größe dieses Faktors ist durch die Einheit des räumlichen Winkels bestimmt. Z. B. in 1 m Abstand von der punktförmigen Lichtquelle 1 HK muß die Netzhaut als ein 1 qm großes Flächenstück mit 1 m als Radius um 1 HK als Mittelpunkt beschriebenen Kugeloberfläche gedacht werden, wenn sie von der Lichtquelle 1 Lm erhalten soll. Proportional mit dem räumlichen Winkel oder der in einem bestimmten Abstande von der Lichtquelle von ihm umfaßten Fläche ändert sich die Zahl der von dieser Lichtquelle in diesen räumlichen Winkel oder auf diese Fläche entsandten Lm.

Für den Teilbetrag der Energiemenge leuchtender Strahlen, welcher Lichtempfindungen auslöst, kann man »Lichtstrom« einsetzen; und die Stärke des Lichtreizes läßt sich durch denjenigen Lichtstrom messen, der eine bestimmte Gruppe von Lichtempfindungen auslöst, oder — im physiologischen Bilde — auf eine bestimmte Netzhautstelle wirkt. Die Netzhautstelle ist aber erst zu definieren. Es sei einmal eine bestimmte Netzhautstelle von der Größe F angenommen, sie werde von der punktförmigen Lichtquelle P bestrahlt. Der F von P aus umfassende räumliche Winkel verhalte sich zur Einheit des räumlichen Winkels wie $k'' : 1$. Für den Abstand F von $P = 1\,a$ sei $k'' : 1 = k'$. Dann hat das Verhältnis des F umfassenden räumlichen Winkels zur Einheit des räumlichen Winkels, mithin das Verhältnis des auf F treffenden Lichtstromes zu dem in die Einheit des räumlichen Winkels entsandten Lichtstrome bei dem beliebigen Abstande F von $P = z\,a$ den Wert k'/z^2a. Der auf F treffende Teil eines von P in die Einheit des räumlichen Winkels entsandten Lichtstroms l' Lm ist $q\,(k'/z^2a)\,l'$ Lm, wenn unter q der bis zum Auftreffen auf F nicht absorbierte Bruchteil des von P auf F strahlenden Lichtstromes verstanden wird. Für einen durch reine Luft gehenden Lichtstrom kann $q = 1$ gesetzt werden; durch reine Luft nämlich wird Licht in nur verschwindend geringem Maße absorbiert; und die Augenmedien absorbieren vom Lichtstrom nur einen zwar noch nicht gemessenen, höchst wahrscheinlich aber auch verschwindend geringen Prozentsatz, würde er bestimmt, so könnte man den Faktor des nicht absorbierten Lichtes als in der Definition vom Lichtstrom enthalten, oder als in k' eingehend annehmen. Für eine Summe leuchtender Punkte P', P'' . . ., die alle aus dem Abstand za auf F gleiche Lichtströme $q\,(k'/z^2a)\,l'$ Lm, $q\,(k''/z^2a)\,l''$ Lm, . . . senden, läßt sich der gesamte auf F wirkende Lichtstrom zu $q\,(k'/z^2a)\,l'$ Lm $+\ q\,(k''/z^2a)\,l''$ Lm $+$ . . . Lm $= \Sigma\, q\,(k/z^2a)\,l$ Lm berechnen; denn es darf die einfache Summation der ausgesandten Lichtströme angenommen werden, wenigstens wenn der absolute Wert der Lichtstärke der leuchtenden Punkte einen gewissen geringen Betrag überschritten hat. Die Formel für einen von P auf F fallenden Lichtstrom ist unabhängig von Größe und Lage des Retinateiles F entwickelt worden. Es läßt sich also für

F das zu einem einzigen Nervenendapparate gehörige Retinastück annehmen. Wenn die Zahl der Nervenendapparate mit den zugehörigen Retinastücken in gleicher Progression wächst, und wenn die einzelnen Nervenendapparate gleich ansprechbar, gleich empfindlich sind, — und beides darf für kleine Retinastücke angenommen werden — dann läßt sich k Lm als Maß für die Lichtreize nehmen, ohne daß F näher definiert zu werden braucht. Da dem Psychologen die Lichtreizstärken nur zur Auslösung und Charakterisierung der Helligkeitseindrücke dienen, genügen ihm die Relationswerte vollkommen. Nur ein Physiologe hätte für den absoluten Energiewert der Lichtreizstärken selbst sich zu interessieren; er würde F irgendwie definieren und daraus für $a = 1$ cm $k = F$ [in qcm] : 100^2 qcm berechnen.

Photometrische Bestimmungen geschehen stets durch Vergleich zweier gleichmäßig beleuchteter Flächen. Es ist gleichgültig, wie groß der Abstand zwischen F und der beleuchteten Fläche B ist, denn der von einem Punkte der Fläche B auf F entsandte Lichtstrom nimmt mit dem Quadrate des Abstandes BF ab, in gleicher Progression nimmt aber zufolge der Dioptrik des Auges die Zahl der auf F einen Lichtstrahl sendenden Punkte zu; wenn also die Punkte der Fläche B in gleichem Abstande von F stehen und gleichmäßig beleuchtet sind, ist das Produkt aus der Anzahl der Flächenelemente und dem reziproken Werte des Quadrates des Abstandes BF, mithin der Wert des von B auf F gesandten Lichtstromes konstant. Also ist der Wert des auf F gelangenden Lichtstromes auch gleich dem, den F erhalten würde, wenn bei dem Abstande $BF = x$ das von B aus Licht sendende Flächenstück $B' \cong F$ wäre. Dieses Flächenstück B' erhielte, wie F an seiner Stelle, den Lichtstrom $L = (k|z^2a)\ l$ Lm; das diffuse Reflexionsvermögen der Fläche B, wenn sie in der Richtung von P beleuchtet wird und nach F hin reflektiert, d. h. der Bruchteil des von B nicht absorbierten Lichtstromes sei $= q$, dann gelangt auf F von B' der Lichtstrom $q\ (k|z^2a)\ l$ Lm, wobei za den Abstand zwischen P und B bedeutet; den gleichen Lichtstrom erhält aber F von B bei jedem beliebigen Abstand, wenn es nur ganz beleuchtet wird.

Das diffuse Reflexionsvermögen einer Fläche ändert sich ziemlich genau entsprechend dem Lambertschen Kosinusgesetz des Einfallswinkels und dem Lambertschen Gesetz für Selbstleuchter: proportional dem Kosinus der Winkel, die der einfallende und der zurückgeworfene Strahl mit der im Einfallspunkte auf der reflektierenden Fläche errichteten Senkrechten bilden, ändert sich also bei nahezu senkrechter Reflexion am wenigsten mit einer Änderung der Reflexionsrichtung und darf dann praktisch als für eine gegebene Fläche konstant angenommen werden. Es gibt keine Fläche, die nicht in mindestens einem Spektralbezirk selektiv reflektiert. Fast grau und ziemlich annähernd weiß ist aber u. a.[1]) Magnesiumoxyd = Magnesia usta (MgO). Von dieser Substanz läßt sich bei

[1]) Hering empfiehlt als »Normalpapier« ein »mattes Barytpapier«; Hering, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn, a. d. Handbuch der Augenheilkunde, 1. Teil, XII. Kap., S. 68.

einiger Übung leicht eine gut gleichmäßige Fläche herstellen, indem käufliches[1]) reines Magnesiumpulver in gleichmäßiger, nicht zu dünner Schicht auf ein Blech aufgetragen und verbrannt wird. Die photometrischen Messungen in der folgenden Arbeit wurden sämtlich auf die von einer Magnesiumoxydschicht bei nahezu senkrechtem Einfall reflektierten Lichtstromeinheit bezogen. Die optische Gleichmäßigkeit der benutzten Schicht oder die Konstanz ihres diffusen Reflexionsvermögens bei gleichen Reflexionswinkeln wurde durch photometrischen Vergleich gleich stark beleuchteter Teile der Fläche sichergestellt. Das diffuse Reflexionsvermögen der Magnesiumoxydschicht sei M′. Der Wert M′ ist ein ebenso konstanter Faktor aller hier wiedergegebenen Bestimmungen von Lichtreizstärken wie k, die Messung von M′ in absolutem Maße darf deshalb dahingestellt bleiben. In der Formel $L = q\ (k/z^2a)\ l$ Lm ist der Wert M′ für q einzusetzen; qk heiße M; für a wurde stets 1 cm gesetzt; danach ist $L = 1/z^2 l$ MLm.

Die Messung der Lichtreizstärken nach MLm läßt sich durch Bestimmung des wohldefinierten M in Lm, also eine allgemein bekannte und wohldefinierte Meßeinheit umrechnen, sie gibt Zahlenwerte, wie sie bei dem üblichen Photometrieren gewonnen werden, wie sie sich leicht versinnbildlichen lassen, und wie sie zur Charakterisierung der Lichtreizstärke dienen.

Die Bogenlampe. Zur Herstellung des Primärreizes, der den ersten Helligkeitseindruck auslösen sollte, wie des Sekundärreizes, mit dessen Helligkeitseindruck das positive Nachbild verglichen werden sollte, war es praktisch, die nämliche Lichtquelle zu benutzen. Als Lichtquelle stand eine Nebenstromlampe mit offenem Lichtbogen, festem Brennpunkte und gewöhnlichen, senkrecht übereinander stehenden Kohlenstiften zur Verfügung. Zwischen Kohlenträger und Arretierung besitzt die Lampe ein Räderwerk zur Erzielung eines minimalen und dementsprechend öfteren Kohlenvorschubes; ein solcher erfolgte ziemlich genau alle $1\,^1/_2$ Minuten. Die Arretierungsperiodizität, demgemäß auch die Lichtintensität zeigten sich konstant erst, nachdem die Arretierungsmagneten auf eine konstant bleibende Temperatur erwärmt waren, nämlich nach etwa 10 Minuten, dann glühten auch die Kohlenstifte gleichmäßig. Die Lampe verbrauchte bei einer Spannung von 110 Volt 12 Ampère. Es konnte ein sehr großer Vorschaltwiderstand benutzt werden, so daß die periodischen Schwankungen in der Lichtstärke der Bogenlampe stark heruntergedrückt wurden. Nach einem Bericht aus der Bogenlampenfabrik Körting & Matthiesen hat die von dort gelieferte Lampe eine mittlere räumliche Lichtstärke von

[1]) Das käufliche Magnesium, besonders das in Draht- oder Bandform, ist häufig nicht rein, sondern enthält etwas Zinn; dadurch wird die Verbrennungsasche dunkler. MgO ist als Magnesia usta in Apotheken als feines Pulver erhältlich; dies Pulver ist locker und läßt sich deshalb direkt nur für einen horizontal stehenden Photometerschirm verwenden; es kann dann ein anderer Photometerschirm aus möglichst weißem Papier bei hochstehender Sonne auf sein diffuses Reflexionsvermögen mit dem MgO verglichen werden.

121×10 HK, und die verschiedenen während einer Schwankungsperiode gemessenen Lichtstärken differieren im ungünstigsten Fall um höchstens 10 %. (Zur Messung diente das Ulbrichtsche Kugelphotometer.) Eine in ihrer Intensität konstantere Lichtquelle als die Bogenlampe wäre besonders eine Nernst-Projektionslampe; aber bei deren Gebrauch hätte sich schwieriger und nur mit neuen Fehlerquellen eine punktförmige Lichtquelle herstellen lassen — Vorversuche mußten entscheiden, ob die Lichtquelle eine für die gestellte Aufgabe genügend konstante Intensität hat. Die stärksten Abweichungen der Lichtstärke von ihrem mittleren Werte im Verlauf einer Periode treten nur im Moment des Kohlenvorschubs auf; kurz nach diesem Moment schlägt der Anker des Arretierungshammers hörbar an seinen Magnet an; geschah dies gerade nach einer Reizdarbietung, so wurde der betreffende Versuch im Protokoll gestrichen. An verschiedenen Versuchstagen wurde durch photometrische Messungen kein Unterschied in der Lichtstärke der Bogenlampe gefunden; der maximale Fehler bei diesen photometrischen Messungen betrug $\pm$ 2,6 %. (Die während der einzelnen Schwankungsperioden stattfindenden Intensitätsschwankungen der Bogenlampe machten sich bei diesen mit einem Polarisationsphotometer ausgeführten Messungen gar nicht geltend.) Das gleichmäßige Brennen der Bogenlampe läßt sich durch recht genaues Einsetzen der Kohlenstifte erreichen. Es darf nicht etwa durch irgendeine Vorrichtung die benutzte Lichtstärke nach dem Gedächtnis reguliert werden; nicht einmal der jeweiligen Adaptation wird dadurch Rechnung getragen, denn die Erinnerungsbilder an absolute Helligkeiten sind schon nach sehr kurzen Zeiträumen recht ungenau und sind noch ungenauer nach längeren Zeiträumen wie 24 und mehr Stunden, besonders wenn jedesmal verschiedene Helligkeiten zur Beobachtung gelangen; nach älteren Erfahrungen z. B. von Wirth[1]) war dies schon nicht anders zu erwarten und wurde zudem während der Durchführung der vorliegenden Untersuchungen nachgeprüft[2]).

Wie Trotter beweist[3]), ist die von der Kraterfläche in irgendeiner Richtung ausgesandte Lichtmenge, entsprechend Lamberts Kosinusgesetz des Einfallswinkels, der in dieser Richtung sichtbaren Kraterfläche, also dem Kosinus desjenigen Winkels (annähernd) proportional, welcher die Sehrichtung mit der als Scheibe gedachten Kraterfläche einschließt; dabei ist die von Trotter erwiesene Tatsache, daß die Lichtausstrahlung des Kraters in derselben Weise erfolgt, als ob der Krater eine flache, glühende Scheibe wäre, der weiteren Berechnung zugrunde gelegt. Für eine Bogenlampe mit vertikal stehenden Kohlen sind nach dem Trotterschen Gesetz alle Lichtströme mit gleicher Neigung gegen die Horizontalebene und nur diese einander gleich. Vom Lichtbogen sollten die Lichtströme auf Spiegel gelangen, und von den Spiegeln sollten sie zur Darbietung der Reize auf Milchglasplatten reflektiert werden. Zur Variation der Reizstärke konnte dann nämlich eine Verschiebung der Spiegel führen (durch

[1]) a. a. O., Bd. XVI, S. 480.

[2]) Vgl. u. S. 215—218.

[3]) Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. XIII (1892), S. 433.

Änderung der Lichtweglänge vom Lichtbogen zu den Milchglasplatten). Um die Spiegel in stets gleicher Höhenlage verschieben zu dürfen — und anders wäre die Einstellung zu unbequem gewesen — mußten die Kohlen vertikal stehen, und es mußten die in horizontaler Richtung ausgesandten Lichtströme benutzt werden, da in jeder anderen Richtung die unter sich gleichen Lichtströme einen Kegelmantel bilden. Um von vornherein die Abblendung schädlichen Lichtes zu erleichtern, wurde die Bogenlampe von einem Blechgehäuse umgeben, das im Dach einen lichtdichten Luftschlot hat und das in der Höhe des Lichtbogens in allen den Spiegeln zugekehrten Seiten einen länglichen horizontalen, 3 cm hohen Ausschnitt besitzt. Über und unter dem Ausschnitt wurden außen am Gehäuse Schienen aufgenietet; in die Schienen können schmale Blechstreifen eingeschoben werden, um den gerade nicht benutzten Teil des Ausschnittes zu bedecken. Wo durch den Ausschnitt der Lichtstrom zu den Spiegeln gesandt werden soll, wurden in die Schienen Blechstreifen eingeschoben, in deren Mitte ein rechteckiger Ausschnitt ist; an den Rändern des Ausschnittes war ein pyramidenstumpfförmiger Lichtschacht angenietet worden. Seine Maße waren so gewählt worden, daß der Lichtstrom vom Lichtbogen stets voll auf die Spiegel fallen kann. Die Lichtschachte sind innen mit Kienruß geschwärzt; ebenso ist die Innenfläche des Blechgehäuses in der Höhe des Lichtbogens geschwärzt.

Die Spiegel (*Sp* der Fig. 2) sind aus einem Stück gut planparallelen Glases geschnitten worden und hinten mit Silber belegt. Das Reflexionsvermögen solcher Spiegel ist bei nahezu senkrechtem Einfall des Lichtes nach Hagen und Rubens [1]) 0,8. In jedem Versuche sollten beide Lichtreizstärken leicht geändert werden können, und jede vorkommende Lichtreizstärke sollte in ihrem Werte genau bekannt sein, dazu mußten sich die Spiegel leicht so einstellen lassen, daß die Summe ihrer Abstände vom Lichtbogen und von der zu ihnen gehörigen Milchglasplatte einen bekannten Wert hat. Ein Satz von Loten wurde an Querstangen eines Brettes (*OO'* in Fig. 2) befestigt; die Lote waren für gewöhnlich über das Brett gelegt und wurden nur zur Einstellung der Spiegel herabgelassen; auf einen Knoten im Lotfaden wurde jeweils die Spiegelmitte eingestellt. Die Lage der Fadenknoten und der Lote überhaupt war so gewählt, daß die Summe der Abstände der Knoten vom Lichtbogen und der oberen Milchglasplatte (über *KK'* in Fig. 1) 357,8 cm, 277,1 cm, 226,3 cm, 214,7 cm, 123,9 cm, 101,2 cm oder 32,0 cm und von der unteren Milchglasplatte (unter *KK'*) 527,0 cm, 381,3 cm, 334,6 cm, 186,9 cm, 133,9 cm, 81,9 cm oder 52,7 cm betrug. Die Spiegel waren mittels Kugelgelenken an stabilen, aber handlichen Stativen befestigt und konnten schnell in die gewünschte Lage gebracht werden. Auf die Milchglasscheibe (*KK'* in Fig. 1), welche in die nicht belichtete schwarze Papierwand eingelassen ist, entwarfen die rechteckigen Spiegel ein rechteckiges helles Feld; dies scharf umgrenzte Feld konnte durch Spiegeldrehung leicht genau auf die ihm zukommende Stelle gebracht werden. Die hellen Felder ragen nach allen Richtungen, auch wenn sie am kleinsten sind, mindestens 1 cm über

[1]) Rubens, Zeitschr. f. Instrumentenkunde, Bd. IX (1899), S. 293.

die als Reizflächen benutzten Teile der Milchglasplatten hinaus; die Reizflächen selbst haben voneinander den Abstand 1,49 cm. Es ist leicht, die Spiegel mit genügender Genauigkeit einzustellen, so, daß die hellen Felder auf der zugehörigen, aber noch nicht auf der anderen Reizfläche liegen, indem man stets die einander zugekehrten Ränder der Felder aufeinander fallen läßt; auf den dann deutlich erkennbaren besonders hellen Mittelstreifen kann man sehr gut einstellen. Die aus den verschiedenen Spiegellagen vom Lichtbogen nach der oberen Milchglasplatte reflektierten Lichtströme verhielten sich wie

1 : 1,67 : 2,50 : 2,78 : 8,35 : 12,5 : 125,

die nach der unteren Milchglasplatte reflektierten wie

1 : 1,91 : 2,48 : 7,95 : 15,5 : 41,4 : 100.

Dabei sind die auf die Milchglasplatten auftreffenden Lichtstromstärken dem Quadrate der Lichtweglänge umgekehrt proportional gesetzt worden; die Spiegel reflektierten in den verschiedenen Punkten das Licht unter verschiedenen Winkeln (die Winkelgröße betrug 3° bis 45°), demgemäß änderte sich ihr Reflexionsvermögen; diese Änderung war aber genügend geringfügig, um ihre Vernachlässigung zu gestatten. Daß die beiden Spiegel ein gleiches Reflexionsvermögen besitzen, daß die notwendigerweise schnelle Einstellung der Spiegel auf die Knotenpunkte der Lote, und daß die Lage dieser Punkte selbst genügend genau war, daß endlich die Verschiedenheit des Spiegelreflexionsvermögens vernachlässigt werden durfte, ergaben photometrische Messungen; der maximale Fehler bei diesen Messungen selbst war für den Vergleich der beiden Spiegelreflexionsvermögen gemessen (durch deren Vertauschung) $\pm$ 1,6 %, für die Kontrollierung der erzielten Lichtstromrelationen $\pm$ 1,9 % bis $\pm$ 3,4 %. (Bei den geringsten zu vergleichenden Helligkeiten wurden stufenweise die einander zunächst stehenden Helligkeiten verglichen und nur in der mittleren Breite zur Kontrolle auch noch andere Helligkeitsrelationen untersucht.)

Die durch Spiegelverschiebung erzielte Variation der Primärreizstärke zeigte sich in den Vorversuchen als zur Lösung der Aufgabe genügend, aber der Sekundärreiz mußte in ganz bedeutend geringerer Intensität dargeboten werden können. Durch einen Satz Milchglasplatten durfte die nötige Abdunkelung nicht hergestellt werden; es gelang nämlich nicht, eine Milchglaskombination zu finden, die insgesamt das Licht der Bogenlampe annähernd so weiß durchscheinen ließ, wie eine einzige Milchglasplatte. Ein Episkotister war wegen der kurzen Darbietungszeit der Reizflächen zu deren Abdunkelung ungeeignet; wie Minnemann auf dem Frankfurter Psychologenkongreß betonte, ist die Giltigkeit des Talbotschen Gesetzes für sehr kurz dauernde Reize noch nicht erwiesen[1]). Wenn die Menge des benutzten Lichtstromes mittels einer Spaltvorrichtung variiert werden sollte, mußte ein besonderer Apparat für eine gleichmäßige Lichtverteilung auf der Reizfläche sorgen.

Die Spaltvorrichtung (s. Fig. 1) besteht aus einem geschwärzten, auf Eisenschienen fest montierten, sehr sauberen rechteckigen Ausschnitt

[1]) Vgl. den Bericht über den III. Kongreß für experimentelle Psychologie in Frankfurt a. Main, 1908, herausg. v. Prof. Dr. Schumann, 1909, S. 254.

(QQ') und aus der auf dem Blech gleitenden Zunge (Z), die an dem Gleitschlitten des Schienengerüstes (Sch) gut befestigt ist. Der Gleitschlitten läßt sich durch eine Mikrometerschraube mit 0,05 cm Ganghöhe einstellen. Der vom Spiegel Sp_2 kommende Lichtstrom passiert zunächst den vertikal zu ihm stehenden Spaltausschnitt und trifft dann auf die am Blech angeklebte Milchglasplatte (QQ'). Diese Milchglasplatte hat ein gut gleichmäßiges diffuses Ausstrahlungsvermögen und dient, soweit sie beleuchtet ist, selbst als Lichtquelle für eine zweite Milchglasplatte (KK'), die in der Ebene der unteren Milchglasplatte und parallel zu der sie beleuchtenden Milchglasplatte (QQ') steht. Die beiden übereinander stehenden Milchglasplatten (KK') bestehen aus einem Stück. Die obere den Sekundärreiz gebende Milchglasplatte wird vor schädlichem Licht durch einen viereckigen Lichtschacht (KK'' und $K'K'''$) geschützt; der Schacht ist aus lichtdichten, mit den beiden Milchglasplatten (KK' und QQ') verklebten Pappwänden gefertigt, er ruht auf den schmalen eisernen Schienen (KK'' und $K'K'''$), die wiederum an einem senkrecht stehenden Holzbrett befestigt sind, das nur für die Milchglasplatte KK' einen Ausschnitt besitzt, sonst aber mit einer Papierwand den Raum des Experimentators von dem des Beobachters ziemlich vollständig ablichtet. Als Sekundärreiz dient der von einem (rechteckigen) Flächenstück im oberen Teil der Milchglasplatte KK' zum Auge gesandte Lichtstrom. Die verschiedenen Milchglasplatten sind nur 0,9 mm dick und haben ein nur wenig selektiv verschiedenes Absorbtionsvermögen, so, daß die (unten) durch eine und (oben) durch zwei Platten gelangten Lichtstrahlen in gleicher Farbe und für gewöhnlich sogar farblos erscheinen.

Die Menge des durch die Spaltöffnung durchgelassenen Lichtstromes ist deren Größe direkt proportional. Die verschiedenen Spaltöffnungen sind Rechtecke, deren Höhe konstant bleibt, deren Breite durch Verschiebung der Zunge (Z) variiert wird. Die Verschiebung der Zunge läßt sich an einer 0,05 cm Skala ablesen; deren Nullpunkt liegt bei derjenigen Zungenstellung, in welcher die Spaltöffnung durch die Zunge gerade verdeckt wird. Die Breite des Spaltes wird dann an der Skala unmittelbar abgelesen. Der Mikrometerschraubenkopf (M in Fig. 1) ist 4mal geteilt und läßt sich auf einen festen Zeiger einstellen; die Spaltbreite kann mit Hilfe der Teilungen auf 0,0013 cm geschätzt, auf 0,002 cm genau abgelesen werden; die Genauigkeit der Ablesung kann auf 0,0001 cm kontrolliert werden. Die Schraube wurde stets in gleicher Richtung vom ersten Einspielen der Schraubenspindel in das Schlittengewinde als Ausgangslage gedreht, um einen toten Gang vollständig zu vermeiden. In ihren Nullpunkt läßt sich die Zunge auf 0,007 cm genau einstellen; die scharfe Kante des Blechausschnittes, die zuletzt durch die Zunge verdeckt wird, hebt sich dann als eben noch sichtbare, feine helle Linie von dem sonst tiefschwarzen Blech ab. Die Gewinde der Schraube sind scharfgängig und sehr genau gearbeitet; bei gleichsinniger Drehung spielt sie auf mindestens 0,004 cm genau ein (wie durch Lupeneinstellung der Zunge auf die Linien eines Glasgitters festgestellt wurde). Die geringste zu Reizdarbietungen benutzte Spaltöffnung hatte eine Breite von 0,5 cm.

Dieser Apparat hatte also eine Genauigkeit von mindestens 97,8 %, d. h. der maximale Einstellungsfehler betrug ± 1,1 %.

Die auf das Spaltblech angeklebte Milchglasplatte (QQ') ist in ihren verschiedenen Teilen gleichmäßig durchscheinend, wie durch Photometrieren festgestellt wurde, der maximale Fehler dieser Aichung war ± 1,1 %.

Der Lichstrom L'', der von dem beleuchteten Teil F' der Milchglasplatte QQ' auf einen bestimmten Teil F'' der Milchglasplatte KK' gesandt wird, ist nach Lamberts zusammengesetztem photometrischen Grundgesetz[1]): $L'' = [(F' F'' \cos \hat{A} \cdot \cos \hat{E}) : a^2]\ w L'$, wenn L' den auf F' auftreffenden Lichtstrom, a den Abstand zwischen F' und F'', $\hat{A}$ den Ausstrahlungswinkel von F' in der Richtung nach F'' und $\hat{E}$ den Einfallswinkel auf F'' bedeutet und wenn $w = v : (F' \cos \hat{A})$, worin v das Strahlungsvermögen von F' in der Richtung von $\hat{A}$ ausdrückt, d. h. angibt, ein wie großer Teil des in F' auftreffenden Lichtstromes unter dem Ausstrahlungswinkel $\hat{A}$ weitergesandt wird. Von F'' soll ein Lichtstrom durch die Milchglasplatte KK' (vgl. Fig. 1) hindurch auf deren andere Seite gelangen und hier den als Reizfläche dienenden Teil der Milchglasplatte treffen; und Lage und Größe der Reizfläche ist durch die Lage der Augen in A' und A'' über der Kinnstütze (vgl. Fig. 2) und durch den Ausschnitt (A'' der Fig. 3) in der Papierwand unveränderlich bestimmt. Lage und Größe von F'' ist dadurch mitbestimmt, also konstant; die Fläche F'' hat 2,58 · 0,90 qcm Inhalt. Die Größe der Fläche F' ändert sich proportional dem Wachstum der Spaltbreite von 0,50 · 1,00 qcm bis 3,38 · 1,00 qcm; diese Breitenänderung geschieht einseitig, in Richtung der sich zurückziehenden Zunge; dadurch ändert sich die Lage des Schwerpunktes der Fläche F', dieser verschiebliche Schwerpunkt A ist Scheitel des Winkels $\hat{A}$, der Scheitel E des Winkels $\hat{E}$ ist Schwerpunkt der Fläche F'', deren Größe und Lage bleibt konstant, er selbst auch; mit einer Spaltverschiebung ändert sich also die gegenseitige Lage der Punkte A und E. Die einander gleichen Werte der Winkel $\hat{A}$ und $\hat{E}$ wachsen mit Zunahme der Spaltbreiten 0,50 cm bis 1,40 cm von 6° 35,6′ bis 6° 36′ und sinken mit weiter zunehmenden Spaltbreiten 1,40 cm bis 3,38 cm von 6° 36′ auf 6° 34′. Das diffuse Ausstrahlungsvermögen w der Milchglasplatte KK' wurde durch photometrische Messungen bei den Ausstrahlungswinkeln 6° und 7° als konstant bestimmt; der maximale Fehler bei dieser Photometrierung betrug ± 1,1 %. Danach ist die Flächenhelligkeit $(v L') : (F' \cos \hat{A})$ in allen vorkommenden Fällen konstant, mithin ist die von Lambert nur für eine konstante Flächenhelligkeit bewiesene Formel anwendbar und die Formel vereinfacht sich zu $L'' = [(F'' \cos \hat{E}) : a^2] \cdot v L'$, worin $(F'' v) : a^2$ eine Konstante c und L' proportional zu F' ist. Für die benutzten Spaltbreiten sinkt zunächst der variable Faktor $\cos \hat{E}$, der samt der Konstanten c mit dem Werte des auf F' gelangten Lichtstromes L multipliziert werden muß, um den Wert des auf F'' auftreffenden Lichtstromes zu erhalten, mit zunehmender Spaltbreite von 0,99340 c bis 0,99338 c und wächst dann bis 0,99343 c. Die größten Änderungen dieses variablen Faktors

[1]) Lambert, photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum umbrae. Augsburg 1760; Ostwald, Klassiker (1892), Nr. 31, 32, 33.

betragen also weniger als 0,005 % und wurden deshalb gänzlich vernachlässigt. Der Faktor cos $\hat{E}$ wurde als konstant angenommen, und die benutzten Reizflächen konnten demgemäß den Spaltbreiten F' direkt proportional gesetzt werden. Photometrische Kontrollmessungen bestätigen die Berechtigung des Verfahrens.

Das für den Sekundärreiz als Reizfläche dienende Rechteck R, auf das der Lichtstrom von F'' nach seinem Durchgang durch die Milchglasplatte trifft, entsendet in der Richtung nach den 11,5 cm über der Mitte der Kinnstütze im Punkte A gedachten Augen von allen seinen Teilen gleich starke Lichtströme, und die Reizfläche erscheint gleichmäßig hell; das ergaben photometrische Messungen, deren maximaler Fehler ± 1,1 % beträgt. Die Augen durften bei dieser Bestimmung von R, wie bei der vorhergehenden von F'', als im Punkte A liegend angenommen werden. Nämlich bei Berechnung der Lage von R statt für ein im Punkte A gedachtes Auge für die beiden Augen in ihrer wirklichen Lage ergibt sich für die sehr große Pupillendistanz: »8 cm« als größte Verschiebung des Schwerpunktes E der Fläche F'' 0,033 cm, demgemäß ändern sich die Winkel $\hat{E}$ nur um Bruchteile einer Bogenminute, und cos $\hat{E}$ ändert sich um weniger als 0,000005 %; es dürfen also für die Berechnung der Ergebnisse beide Augen als im Punkte A liegend angenommen werden.

Auf die Reizfläche R' des Primärreizes wird der vom Lichtbogen kommende Lichtstrom vor seinem Durchgange durch den untern Teil der Milchglasplatte KK' direkt vom Spiegel Sp_1 reflektiert; die Reizfläche wird durch den Ausschnitt (A') in der Papierwand den in A gedachten Augen dargeboten. Der Ausschnitt (A') für die Primärreizfläche hatte die gleiche Größe und die korrespondierende Lage vertikal unter dem Fixierpunkt F wie der Ausschnitt (A'') für die Sekundärreizfläche vertikal über dem Fixierpunkt F (vgl. Fig. 3 und auch Fig. 1 und 2); F liegt in gleicher Horizontalebene mit den Augen des Beobachters, mit dem Punkte A; die beiden rechteckigen Reizflächen werden infolgedessen unter den gleichen Gesichtswinkeln gesehen; für die vertikalen Rechteckseiten beträgt dieser Winkel 0° 33′, für die horizontalen 1° 23′. Ganz entsprechend wie für die Sekundärreizfläche wurde für die Primärreizfläche durch photometrische Messungen mit dem maximalen Fehler ± 1,1 % gezeigt, daß die Reizfläche den Augen des Beobachters gleichmäßig hell erscheint.

Der kurz Fixierpunkt genannte kreisrunde Fleck F (Fig. 1, 2 und 3) sollte während der Versuche starr fixiert werden, also auf der macula lutea sich abbilden; dementsprechend bildeten die F zugekehrten Seiten der als Reizflächen dienenden Rechtecke R und R' sich in der Entfernung 0° 28′ von der Netzhautmitte ab, die F abgekehrten Seiten in der Entfernung 1° 1′; d. h. die Rechtecke bildeten sich auf der Randzone der macula lutea ab[1]).

Der Fixierpunkt (s. Fig. 1, 2 und 3) erhält sein Licht von der Fixierpunktlampe (s. Fig. 2). Das ist eine elektrische Glühlampe, die den

[1]) Der ganz stäbchenfreie Bezirk hat nach Koster eine Ausdehnung von etwa 2°, nach Nagel von 1,35° bis 1,8°; vgl. Nagel, Handb. d. Physiol. d. Mensch., Bd. III (1905), S. 188.

Widerstandslampen und damit auch den beiden Magneten des Berlinerschen Pendels parallel geschaltet ist. Die während des Versuchs abwechselnd durch einen kurzen Nebenschluß in einem dieser Magnete entstehenden Stromschwankungen sind wegen der hohen Vorschaltwiderstände gering und kurzdauernd genug, um ein gleichmäßiges Glühen der Fixierpunktlampe nicht zu verhindern. Die Lampe ist in einen lichtdichten Kasten eingebaut worden, der nur in der Richtung auf F zu eine Öffnung besitzt; um die Öffnung ist der leichteren Abblendung allen schädlichen Lichtes wegen ein Lichtschacht an das Kästchen angeklebt. Auf der Diaphragmawand bildet sich ein vergrößertes, umgekehrtes reelles Bild des Glühfadens ab, ein kreisrundes Loch mit dem Durchmesser von der Breite des Glühfadenbildes läßt einen Lichtstrom auf die Konvexlinse fallen, die den Lichtstrom auf der Papierwand zu dem kreisrunden, scharfumgrenzten Fleck F sammelt. Ein Lichtschacht um die Linse sorgt hier für Abblendung schädlichen Reflexlichtes. In den Gang der Lichtstrahlen können mit Hilfe einer Schienenvorrichtung am Diaphragma leicht Gelatinefilter zur Färbung oder zur Abdunkelung des Fixierpunktes eingeschaltet werden.

Der geeignetste Abstand für einen Fixationspunkt wäre vielleicht 200 cm. Wenigstens hat Mayerhausen aus seinen Untersuchungen über die Größenverhältnisse der negativen Nachbilder bei verschieden weit abstehenden reagierenden Flächen erschlossen, daß beim Fehlen einer solchen Fläche die Nachbilder auf 200 cm Abstand lokalisiert würden, und daß die hiermit gegebene Augenstellung und Akkomodation der Ruhestellung des Auges entspräche. Der aus technischen Gründen gewählte Abstand von 65 cm erwies sich aber für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung als vollkommen geeignet.

Das kurz Berlinersches Pendel genannte, schon von Berliner benutzte Pendeltachistoskop[1]) hat einen von seiner Achse herunterhängenden Pendelstab von 63 cm Länge; an dessen Spitze befindet sich ein eiserner Anker. Dieser Anker wird bis zum Versuche von dem Elektromagneten M^2 gehalten (Fig. 2). Wenn durch Stromunterbrechung im Magneten M^2 der Anker losgelassen wird, schwingt er hinüber zu dem zweiten Elektromagneten M^1, der an Stelle eines von Berliner benutzten mechanischen Fängers angebracht worden war. Beide Elektromagnete sind einem Satze gut eingedunkelter Widerstandslampen parallel geschaltet. Die zum Magneten M^2 führende Stromleitung hat an den Eintrittsstellen zum Magneten eine Abzweigung zum Rade eines Wundtschen Zeitsinnapparates und zu einem Drehkontakt dieses Apparates; bei Berührung der Radnase des Zeitsinnapparates mit dem Arm dieses Drehkontaktes (aber nur während dieser Berührung) wird die zu M^2 führende Stromleitung kurz geschlossen, und M^2 läßt den eisernen Anker des Pendels los.

Die zum Magneten M^1 führende Stromleitung hat an den Eintrittsstellen zum Magneten eine Abzweigung zu Hammer und Amboss eines Meumannschen Relais. Der Hammer wird über dem Amboss durch einen

[1]) Beschrieben und abgebildet in den Psychol. Stud., Bd. III, Heft 2/3 (1907), S. 98—100.

Elektromagneten hoch gehalten, der seinen Strom von einem Akkumulator erhält. Dieser Strom kann durch Umwerfen eines Unterbrechungskontaktes an einem Wundtschen Pendel unterbrochen werden. Das eiserne Wundtsche Pendel ist seitlich an einem Elektromagneten M^2 aufzuhängen, so daß die Nase des Pendels (welche den Arm des Umwerfkontaktes umstößt) gegen ihre Stellung in der Gleichgewichtslage des Pendels um 6,2 cm verschoben wird. Der durch M^2 fließende Strom kommt von einem Akkumulator und kann mittels eines Wundtschen Drehkontaktes am Zeitsinnapparat, nach Drehung des Kontaktarmes durch die Radnase des Zeitsinnapparates, unterbrochen werden. Die Zeit von der Stromunterbrechung im Drehkontakte bis zur Stromunterbrechung im Umwerfkontakt kann durch Verschiebung des Umwerfkontaktes entgegen der Nase des Wundtschen Pendels und durch Verschiebung des Gleitgewichtes auf der Pendelstange um 6891 σ variiert werden. Der auf einem Schlitten montierte Unterbrechungskontakt läßt sich in einer Geleisführung eines Zahngetriebes verschieben und nach einer Skala so genau auf seine frühere Lage wieder einstellen, daß der Einstellungsfehler eine Zeitdifferenz von höchstens 5 σ bewirkt. Die Änderung der reduzierten Länge, also die Verlagerung des Schwerpunktes, des physischen Pendels läßt sich durch Verschiebung eines festschraubbaren Gleitgewichts herstellen, dabei hat der Einstellungsfehler eine Zeitdifferenz von höchstens 22 σ zur Folge. Wird der den Relaishammer haltende Elektromagnet stromlos gemacht, so fällt der Hammer gegen seinen Amboss, und der durch den Elektromagneten M^1 des Berlinerschen Pendels führende Stromkreis wird kurz geschlossen; der eiserne Anker wird infolgedessen von M^1 losgelassen, und das Pendel schwingt zurück, so daß der Anker wieder an den Magneten M^2 sich anhängt.

An dem über der Achse des Berlinerschen Pendels befindlichen Teil der Pendelstange sind quer zur Stange in Metallbacken lichtundurchlässige Papiersektoren eingeklemmt (entsprechend den Berlinerschen Aluminiumsektoren). Diese Papiersektoren verdecken dem Beobachter die Reizflächen R und R', außer für eine bestimmte Zeit während des Hin- und Herschwingens des Pendels, wo durch Ausschnitte im Pendel während einer ganz bestimmten Zeit die Reizflächen dargeboten werden können. Während des Hinschwingens sollte aber nur die untere, während des Herschwingens nur die obere Reizfläche dargeboten werden. Dies konnte durch eine Papierscheibe bewirkt werden, die als Pendel vor den beiden Reizflächen hing, bei jedem Hin- und Hergang des Pendels während des letzten Teiles der Schwingungszeit durch einen Faden mitgerissen wurde, während des übrigen Teiles der Schwingungszeit aber ruhig vor den Reizflächen hing und dann durch einen Ausschnitt beim Hingange des Pendels die untere, beim Hergange die obere Reizfläche dem Beobachter aufdeckte. Diese automatische Vorrichtung war für den Experimentator sehr bequem, aber die für den Beobachter nötige vollkommene Ablichtung (schädlichen, seitlich diffus reflektierten Lichtes) konnte dabei nur sehr schwer herbeigeführt werden, denn die Scheibe hätte zwischen zwei Ablichtungswänden schwingen müssen, damit zu dem von der einen Reizfläche kommenden Lichtstrom nicht Reflexlicht von der anderen Reizfläche sich

hinzugesellte. Deswegen ist zwischen dem Berlinerschen Pendel und der Papierwand eine Schiebervorrichtung (*SS* in Fig. 1 und 2) angebracht worden; der Schieber kann vor den beiden Ausschnitten (*A'* und *A''*) in Schienen zwischen zwei Anhalteklötzchen vom Experimentator mit der Hand hin- und hergestoßen werden, so daß er in seinen Endstellungen abwechselnd einen der beiden Ausschnitte verdeckt. Der Schieber wurde vor jedem Versuch in die erste Endstellung geschoben, so daß sich beim Hinüberschwingen des Pendels dem Beobachter die Primärreizfläche darbot. Die Zeitdauer, während welcher der Pendelanker am Fangmagneten M^2 hing, genügte stets, um unterdes den Schieber in die zweite Endstellung zu stoßen, so daß sich beim Zurückschwingen des Pendels die Sekundärreizfläche darbot.

Um genügend lange die Reizfläche darbieten zu können, hat das von Berliner benutzte Balanciergewicht erheblich vermehrt werden müssen. Dieses Balanciergewicht und das stabile Moment des Papiersektorgewichtes zur Pendelachse blieben während sämtlicher Versuchsreihen konstant. Infolgedessen blieb auch die Schwingungsdauer des Pendels konstant. Der Pendelanker wurde beiderseits leicht von den Magneten aufgefangen. Ein Satz ausbalancierter Papiersektoren war hergestellt worden, und es konnte damit der Primärreiz 12 σ, 64 σ, 110 σ, 166 σ, 253 σ und 510 σ, der Vergleichsreiz 310 σ und 346 σ dargeboten werden. (Das hierzu nötige regelmäßige Hin- und Herschwingen des Berlinerschen Pendels wäre schon bei einer prozentual sehr geringen Änderung im statischen Moment der Papiersektorgewichte zur Pendelachse unterblieben, wie die mit verschiebbaren Sektoren angestellten Vorversuche in lästiger Weise lehrten.) Die Zeitaichungen haben einen Fehler von höchstens $\pm$ 2,5 σ, d. i. von $\pm$ 20,8 % bis $\pm$ 0,5 %; daß aber die Fehler den hohen Wert von $\pm$ 20,8 % nie auch nur annähernd erreichen, läßt sich aus der guten Übereinstimmung der Aichungsergebnisse mit den aus den Sektorwerten berechneten Werten schließen. Auf Grund der mindestens bis auf 1 % genauen Aichungsergebnisse für die weitesten Sektoröffnungen und auf Grund der Sektorbreiten wurden nämlich die Zeiten für die weniger breiten Sektoröffnungen berechnet, und die berechneten Werte unterscheiden sich von den Messungsergebnissen um höchstens 9,7 %. Zudem führten die verschiedenen Aichungen stets zu den nämlichen Ergebnissen.

Für eine Neukonstruktion des Berlinerschen Pendels würde es sich empfehlen, die Stützen des Haltemagneten M^1 und des Fangmagneten M^2 stabiler zu bauen, die Pendelachse zu verkürzen, also den ganzen Apparat zu verschmälern, und das Balanciergleitgewicht mit einem anderthalbmal so schweren Zusatzgewicht zu versehen.

Am Wundtschen Zeitsinnapparat führen Neueinstellungen der Drehkontakte auf ihre Skalenpunkte zu erheblicheren Zeitfehlern als Neueinstellungen des Umwerfkontaktes am Wundtschen Pendel. Deswegen blieben die Drehkontakte am Zeitsinnapparat konstant an ihrer Stelle; und mußten sie einmal abgenommen werden, wurde eine neue Zeitaichung vorgenommen. Um die Zeiten für das Hin- und Herschwingen des Berlinerschen Pendels auch durch Vermeidung von remanentem Magnetismus in

den Magneten M, M^1 und M^2 möglichst konstant zu machen, wurden die zu den Magneten führenden Ströme nach jedem Versuch gewendet (der besseren Übersichtlichkeit wegen sind die Stromwender in Fig. 2 nicht eingezeichnet); außerdem sind die Eisenkerne der Magnete am Berlinerschen Pendel mit dünnen Papierchen überklebt worden, um das sofortige Abreißen des eisernen Ankers nach jeder Außerstromsetzung seines Elektromagneten zu erleichtern. Damit die Zeit zwischen dem Umstoßen der beiden Drehkontakte durch die Nase am Rade des Zeitsinnapparates stets die genau gleiche war, wurde das Gewicht des Apparates mittels des Rades vor jedem Versuche bis zu einer feststehenden Marke aufgezogen, so daß die in Betracht kommende Fallgeschwindigkeit auch dann als stets gleich gelten konnte, wenn trotz des Windflügelregulators das Gewicht des Apparates nicht gleichmäßig genug sinken sollte.

Auf einen Satz von Punkten der Skala des Wundtschen Pendels ist der Umwerfkontakt eingestellt und dazu die Intermittenszeit vom beginnenden Auftreten des Primärreizes bis zum beginnenden Auftreten des Sekundärreizes gemessen worden. Eine noch weiter gehende Variation wurde durch Benutzung des Laufgewichtes des Wundtschen Pendels erreicht. Die geaichten Intermittenszeiten dauerten 1390 σ, 2078 σ, 3542 σ, 5101 σ, 6873 σ und 8969 σ; leicht konnten beliebige dazwischen liegende Intermittenszeiten dargeboten und geaicht werden. Der Messungsfehler beträgt hierbei höchstens $\pm$ 2,5 σ; und die Intermittenszeiten wurden mit einem Fehler von höchstens $\pm$ 2,5 σ konstant dargeboten, also mit einem maximalen Fehler von $\pm$ 0,18 % bis $\pm$ 0,03 %.

Die Papierwand steht etwa 65 cm vor dem Beobachter, sie war aus einer Rolle schwarzgrauen Papiers herausgeschnitten worden; sie reicht von der Augenhöhe des Beobachters hinauf etwa 80 cm, hinunter 40 cm und wölbt sich unten bis gegen den Fuß der Kinnstütze. Beleuchtet wird die Papierwand von einer mattierten 25kerzigen Tantallampe, die 110 cm über der Augenhöhe des Beobachters schräg hinter ihm hängt (s. ihre Horizontalprojektion ML in Fig. 2). Der Beobachter kann zum Helladaptieren auf einer etwa $2 \cdot 100^2$ qcm großen Fläche hin und her schauen. Die Fläche erscheint annähernd gleichmäßig hell in einer Stärke von etwa 1 MLm; der maximale Fehler bei diesen Messungen beträgt 9 %. Mehr als etwa 40 % betragende Helligkeitsunterschiede, die eine annähernd gleichmäßige Adaptation des Beobachters hätten stören können, wurden im ganzen Bereiche der beim Hin- und Hergehen der Augen vorkommenden Gesichtsfelder vermieden.

Wollte man ein Auge vollkommen gleichmäßig sich adaptieren lassen, so genügte nicht einmal ein alle Netzhautpartien gleich stark reizendes Gesichtsfeld. Da nämlich die einzelnen Netzhautpartien verschieden empfindlich sind, müßten sie bei einer größeren Empfindlichkeit entsprechend weniger stark gereizt werden. Ließe sich ein danach zu forderndes Adaptationsfeld einem starr fixierenden Augenpaar darbieten, so würde dann mit dem Aufhören von wahrnehmbaren Helligkeitsunterschieden wahrscheinlich ein Wahrnehmen des Adaptationsfeldes überhaupt aufhören, sobald die Sehvorgänge, die zuvor stattgefunden hatten, in ihrer Verschiedenheit nicht mehr wirksam sind. Mit der Darbietung eines

alle Netzhautpartien gleich stark reizenden Gesichtsfeldes aber, wie man es für Dunkeladaptation eines Auges durch dessen völlige Eindunkelung herstellt, und für irgendeine Helladaptation durch eine vom Mittelpunkt her gleichmäßig beleuchtete und nach dem im Mittelpunkt befindlichen Auge gleichmäßig Licht reflektierende Halbhohlkugelinnenfläche erreichen könnte, wäre ein Adaptationszustand genau definiert. Die verschiedenen Adaptationszustände sind indes längst nicht genau genug bekannt, um eine mit derart peinlicher Sorgfalt durchgeführte Bestimmung des Adaptationszustandes für andere Untersuchungen, wie z. B. die vorliegende, irgend verwerten zu können.

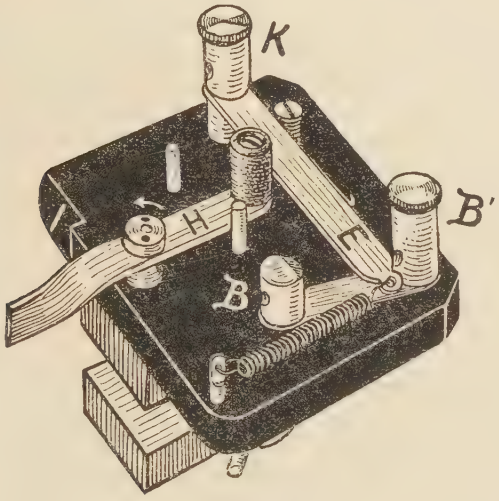
Die Papierwand hätte (um etwa 135 cm) weiter ab vom Beobachter aufgestellt werden sollen, damit die Kanten miteinander verklebter Papierstücke und kleiner Fehler im Papier dem Beobachter nicht wahrnehmbar sind. Dann hätten aber die Reizflächen R und R', sofern sie unter gleichen Gesichtswinkeln wie in der geschilderten Anordnung gesehen werden sollten, entsprechend vergrößert werden müssen. Dabei wäre es erheblich schwieriger gewesen, ihre Helligkeit gleichmäßig zu gestalten, hätte sich jedenfalls mit dem benutzten, leicht zu handhabenden Instrumentarium nicht durchführen lassen; und die Papierwand ist immerhin so weit von den Augen entfernt, daß die erwähnten Papierfehler bei ruhigem Hin- und Hergange der Augen kaum wahrgenommen werden können, also den Adaptationszustand wohl nur unwesentlich beeinflussen.

Eine gleichmäßige Beleuchtung der zum Adaptieren dienenden Papierwand wird durch einen hinter der Tantallampe vertikal stehenden weißen Papierschirm (vgl. Fig. 2) unterstützt. Die mittlere Lichtstärke einer Tantallampe senkrecht zur Lampenachse, die für die Frage nach der Beleuchtung der Adaptations-Papierwand in Betracht kommt, nimmt nach den Angaben der Fabrikanten von der 50. bis zur 800. Brennstunde nur allmählich und wenig ab[1]). Durch Mattieren einer Lampenbirne wird freilich die Temperatur ihres Glühfadens erhöht, mithin dessen Nutzlebensdauer verkürzt. Deswegen wurde eine Tantallampe jeweils nur von ihrer 40. bis zu ihrer 500. Brennstunde benutzt; photometrische Messungen zeigten zu Beginn und zu Ende ihres Gebrauches keinen Unterschied in ihrer Lichtstärke; der maximale Fehler dieser Messungen ist 9 %. In der nämlichen Weise zeigten verschiedene mattierte 25kerzige Tantallampen während ihrer entsprechenden Lebenszeit eine konstante Lichtstärke. (Während der ersten 40 Brennstunden, während deren ihre mittlere horizontale Lichtstärke um 10 % zunahm, wurden die Tantallampen irgendwo zur Zimmerbeleuchtung oder dergl. verwandt.)

Durch die Unterbrechung des Stromes der Tantallampe wird der Raum vor dem Beobachter verdunkelt, und auch nach einstündiger Dunkeladaptation ließ sich dann außer dem Fixierpunkt F kein Licht wahrnehmen. Das Nachglimmen des Glühfadens nach der Stromunterbrechung reicht infolge der Mattierung der Lampe nicht aus, um die Papierwand in einer auch nur eben merklichen Weise zu beleuchten. Die Zeit vom Einschalten

[1]) Vgl. hierzu die Messungen Sharps, The Electrician, London, 1906, 2) 57, S. 492.

der Tantallampe bis zu ihrem vollen Leuchten durfte in einer regelmäßigen Versuchsreihe vom 2. Versuch an als konstant gelten; dann verminderte sich die Temperatur des Glühfadens nach jeder Stromunterbrechung nicht mehr bis zu seiner Ausgangstemperatur. Die Aus- und Einschaltung der Tantallampe wird durch Drehkontakte (I und IV in Fig. 2) am Zeitsinnapparat besorgt, in ähnlicher Weise wie die Stromunterbrechung im Drehkontakt (III) zum Magneten des Wundtschen Pendels erfolgt. Die Konstruktion dieser Kontakte läßt sich aus der Abbildung des Einschaltkontaktes (Fig. 4) leicht ersehen. Nach einem Anstoß durch die Radnase (des Zeitsinnapparates) wird der doppelarmige Hebel *H* im Sinne der Pfeilrichtung gedreht. Nun sitzt dem Ende von *H* ein glattes Ebonitröllchen auf; gegen dies leicht verschiebbare Röll-



Figur 4.

Einschalt-Drehkontakt (zum Wundtschen Zeitsinnapparat gehörend).

chen ist der einarmige Hebel *E* angepreßt, und zwar durch zwei Federn, deren Anfangs- und Endwirkung eine gleichmäßige Resultante ergiebt. Sofort bei Beginn einer Drehung von *H* schießt *E* um seine Achse *K* auf den Bolzen *B*, dessen senkrecht zur Drehrichtung eingefeilte Abschrägungskante einen Stromschluß sichert, der glatt verläuft und zur stets gleichen Zeit nach der *H*-Bewegung eintritt. Für die Hauptversuchsreihen sind die Drehkontakte am Zeitsinnapparat konstant so eingestellt worden, daß die Unterbrechungszeit, also die gesamte Abdunklungszeit eines Versuches 11372 σ und daß die Zeit vom Beginn der Dunkelheit bis zum Beginn des Primärreizerscheinens 2558 σ beträgt; dabei kommen Zeitfehler von höchstens $\pm$ 5 σ vor, und der Messungsfehler der Aichung beläuft sich auf höchstens $\pm$ 5 σ. Um die gesamte Dunkelzeit zu erhalten, wäre zu 11372 σ noch die Zeit vom Einschalten

der Lampe bis zu ihrem vollen Leuchten zu addieren; diese Zeit wurde als konstanter und auf höchstens 3 % des Gesamtwertes zu schätzender Summand vernachlässigt.

Die photometrischen Messungen wurden mit Hilfe eines Polarisationsphotometers und einer von Siemens gelieferten Hefnerlampe unter Berücksichtigung aller Vorsichtsmaßregeln[1]) nach der Anleitung von Kohlrausch[2]) durchgeführt.

Die Zeitaichungen der Reizdarbietungsdauer wurden durch Registrierung auf einer berußten, rotierenden Kymographionschleife mittels eines Krueger-Wirthschen Kehltonschreibers gewonnen, indem an den Stellen, wo die Sektoröffnungen des Berlinerschen Pendels die Lichtströme von den beiden Reizflächen R und R' für deren Darbietungszeit hindurchließen, während einer Pendelschwingung, senkrecht zu dem Sektor ein feiner Luftstrom geblasen wurde, der nur während des Vorüberschwingens der Sektoröffnung auf die andere Seite des Sektors hindurchgelassen, dort von einem Glasröhrchen aufgefangen, zum Kehltonschreiber fortgeleitet wurde und einen Ausschlag der Schreibborste bewirkte. Die Borste sprach dank ihrer guten Elastizität mit einem ruckförmigen Ausschlag auf den Beginn des Luftstromes an und sprang aus ihrer Ausschlagsstellung nach Unterbrechung des Luftstromes ruckweise zurück. Die Borste zeichnete eine Linie auf, die zu Beginn des Luftstromes sich mit einem scharfen Knick zur Seite wandte, während der Dauer des Luftstromes in gleicher Abbiegung weiterging und zu Ende des Luftstromes mit einem scharfen Knick zu ihrer Ausgangsrichtung zurückkehrte. Gleichzeitig mit der Borstenlinie wurde neben ihr eine 9,7 σ-Zeitmarkierung mit Hilfe eines (geaichten) Bernsteinschen Federunterbrechers notiert; die Zeiten der Borstenlinie können daher auf 5 σ genau abgelesen werden. Der Luftstrom wurde anhaltend mit ziemlich gleichbleibender Kraft aus einer spaltförmigen Glasrohrspitze in vertikaler Richtung gegen den Pendelsektor geblasen und von einer ebenso geformten in 0,5 cm Abstand auf der anderen Seite des Sektors ihr genau gegenüberstehenden Glasrohrspitze, solange der Ausschnitt des vorübersausenden Sektors den Weg freigab, aufgefangen und durch einen dickwandigen Gummischlauch zum Kehltonschreiber geleitet. Die Spalte der Glasrohrspitzen standen so, daß der kurze Querdurchmesser des Luftstromes nach dessen Austritt aus ihrer hohen und schmalen Öffnung in der Bewegungsrichtung des Pendels lag, so daß der Luftstrom beim Vorüberschwingen der Sektoröffnung genügend ruckweise auf- und abgesperrt wurde. Der Einfluß auf die Schwingungsdauer des Pendels durch die Reibung des Luftstromes an dem vorüberschwingenden Sektor durfte im Hinblick auf die große Masse des Pendels unberücksichtigt bleiben. Vom Übergang des Luftstromes aus einer Glasrohrspitze in die andere bis zum Ansprechen der Borste des Kehltonschreibers dauerte es so kurze Zeit, daß das Eintreten des Sektorausschnittes vor die Glasrohrspitze und das Ansprechen der unmittelbar daneben und parallel zur Sektorkante aufgestellten Borste simultan zu sein schienen. Bei Bestimmung der Zeit

[1]) Vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[6], Bd. I, S. 661.

[2]) Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik[9], S. 309.

von der Ausschaltung der Tantallampe bis zum Beginn der Darbietung des Primärreizes, die 2558 σ beträgt, durfte diese Zeit als ein im Verhältnis zum ganzen Werte unbedeutender Summand vernachlässigt werden. Bei einer Bestimmung der Darbietungszeit der Reize mußten die Verzögerungszeiten der Borstenaufzeichnungen nach Beginn wie nach Schluß des Luftstromüberganges gleich sein, waren also für die Messungsergebnisse belanglos. Die Elastizität des Gummischlauches brauchte auch nicht in Rechnung gezogen zu werden, denn es zeigten sich die gleichen Aichungsergebnisse, ob der Gummischlauch bis auf 20 cm Länge durch Glas- und Metallrohre ersetzt wurde, oder ob er 300 cm lang war. So genau als die Ablesung möglich war, stimmten die Aichungsergebnisse der nämlichen Darbietungszeiten miteinander überein. Der maximale Messungsfehler ist daher in diesen Aichungen gleich dem maximalen Ablesungsfehler : 5 σ.

Die Zeitpunkte von Stromöffnungen und Stromschließungen wurden durch Schreibmagneten auf einer berußten, rotierenden Kymographionschleife notiert, indem die durch Stromöffnungs- oder Schließungskontakte gehenden Ströme statt durch die zugehörigen Apparate, durch Schreibmagnete gesandt wurden. In dieser Weise wurden Zeiten von mindestens 688 σ gemessen. Um die vorkommenden über 11 Sek. dauernden Zeiten bequem aufzeichnen zu können, erhielt das Kymographion eine langsamere Gangart, die Zeiten konnten dann auf mindestens 10 σ, d. i. für die kürzesten Zeiten auf mindestens 1,5 %, genau abgelesen werden. Die Aichungsfehler, welche dabei vorkamen, liegen innerhalb der Ablesungsfehler.

V. Kritik der Versuchsweise und die dazu nötigen Vorversuche.

Die sehr eingehende Beschreibung der Versuchsanordnung, aber nur eine so eingehende Beschreibung, gibt ein genaues Bild von ihrer Brauchbarkeit. Die insgesamt vorkommenden maximalen Fehler in der Helligkeit, in der Dauer oder im zeitlichen Auftreten der dargebotenen Reize, wie aller anderen möglichen Fehlerquellen, lassen sich berechnen. Die Genauigkeit, mit der eine Helligkeitsbewertung des positiven Nachbildes möglich ist, läßt sich mit der Versuchsanordnung bestimmen, falls die Messung der verglichenen Helligkeiten genauer ist als die Schätzung des Helligkeitswertes vom positiven Nachbilde. Und die Kritik der Versuchsanordnung hat das zu fordern: nur einen Bruchteil des größten Unterschiedes unter allen Helligkeiten, die einem in bestimmter Weise ausgelösten positiven Nachbilde gleich geschätzt wurden, darf der maximale Fehler bei der Messung dieser Helligkeiten betragen. Entsprechend dürfen auch die übrigen maximalen Fehler bei der Darbietung der

Reize nur ein Bruchteil von dem Werte sein, der eine merkliche Änderung in der Helligkeitsbewertung eines bestimmten positiven Nachbildes herbeiführt.

Für eine Kritik der Versuchsanordnung ist also zunächst die Genauigkeit zu bestimmen, mit der die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder möglich ist. Das hat mit Hilfe der Anordnung selbst zu geschehen; und dazu muß in einer Reihe von Einzelbeobachtungen das positive Nachbild als in gleicher Weise bestimmt gelten können, d. h. es müssen die Art der Reizdarbietung und die Disposition des Beobachters in allen diesen Versuchen gleich bleiben. Die mit der Versuchsanordnung möglichst annähernd konstante Reizdarbietung sei zunächst als ganz konstant angenommen. Auch die Disposition des Beobachters für den Empfindungsverlauf, wie für die Apperzeption dieses Vorganges sollte konstant bleiben. Demnach sollte die gesamte Adaptationslage zu Beginn eines jeden Versuches und besonders auch die lokale Adaptationslage, dort wo die Reize einwirkten, sich gleich bleiben; und die Disposition zur Auffassung sollte gleichen Grades und gleichartig sein, d. h. die Aufmerksamkeit sollte gleich stark sein; und bei der Auffassung durften sich gar nicht oder wenigstens nicht in wechselnder Weise Erinnerungsbilder an vorausgegangene Erlebnisse geltend machen.

Ein späteres Ergebnis der Untersuchung wird hier einstweilen vorweggenommen, daß nämlich innerhalb einer Versuchsreihe die Helligkeitsbewertung von in möglichst konstanter Weise erzeugten Nachbildern bei Biener um $\pm$ 26,1 %, bei Goldschmidt um $\pm$ 19,3 %, bei Schneider um $\pm$ 20,4 % und bei Dr. Tichý um $\pm$ 16,6 % (des Mittelwertes) zu schwanken pflegen; Helligkeitsbewertungen von positiven Nachbildern, die in gleicher Weise ausgelöst wurden, und deren Helligkeiten innerhalb solcher Schwankungsbereiche liegen, werden der Kürze halber im Folgenden gleich genannt.

Zur Feststellung, ob die Hell-Dunkel-Adaptation bei allen Einzelbeobachtungen die nämliche ist, ob also stets nach der 11 372 σ dauernden Dunkelheit während der 168 · 1000 σ dauernden Helladaptation auf die schwach beleuchtete gleichmäßige Adaptationsfläche bis zum Beginn der nächsten Dunkelzeit die Adaptation zur nämlichen Ausgangslage zurückkehrt, um dann während der Dunkelzeit bis zur Reizdarbietung stets den nämlichen Grad der Dunkel-

adaptation zu erreichen, wurden unter den üblichen Adaptationsbedingungen zur Zeit, wo sonst der Primärreiz dargeboten wurde, Reizschwellenbestimmungen gemacht. Dazu diente ein Apparat, der nur auf eine etwa 30 cm vor dem Beobachter stehende 14,8 · 14,8 qcm große Milchglasscheibe Licht entsandte, und der die gleichmäßige Beleuchtung der Milchglasscheibe mit Hilfe von zwei Irisblenden schnell und sicher variieren ließ[1]).

Zur Reizschwellenbestimmung kann durch Steigerung einer untermerklichen Helligkeit die obere Grenze der noch nicht sichtbaren Helligkeit, sowie durch Minderung merkbarer Helligkeit die untere Grenze der sichtbaren Helligkeit bestimmt werden. Entsprechend der erstgenannten oberen Grenze pflegt man von einem oberen, entsprechend der anderen von einem unteren Schwellenwert zu reden. Nun hat aber der danach obere Schwellenwert stets ein geringeres Maß als der danach untere. Infolgedessen sind diese Bezeichnungen »oberer und unterer Schwellenwert« auch im gerade umgekehrten Sinne verwandt worden. Für die doppeldeutige Bezeichnung »obere und untere Schwelle« wurde die eindeutige und aus dem eben geschilderten Verfahren bei Reizschwellenbestimmungen ohne weiteres verständliche »Aufstiegs- und Abstiegs-Schwelle« eingesetzt.

In einer Reihe von Versuchen unter konstanten Bedingungen pflegt die Aufstiegsschwelle viel erheblichere Schwankungen zu zeigen als die Abstiegsschwelle. Das ist wohl z. T. in der Schwierigkeit begründet, mit der im Dunkeln Gebilde des Eigenlichtes von objektiven Gesichtseindrücken unterschieden werden können[2]), also in apperzeptiven Faktoren, z. T. aber auch in dem großen Einfluß, den die Geschwindigkeit der Helligkeitsänderung auf die Höhe der Anstiegsschwelle hat; denn diese Geschwindigkeit kann bei der manuellen Handhabung der Irisblende kaum genügend konstant sein, so daß nicht allein durch eine Variation dieser Geschwindigkeit ein Schwanken der Aufstiegsschwelle bewirkt werde. Es war mit dem erwähnten Apparat leicht, durch schnelle Helligkeitsvermehrung eine Schwelle zu erhalten, die erheblich unter der Schwelle lag, zu der man sich unter sonst konstanten Bedingungen durch langsame Hellig-

[1]) Der Apparat wird von Schneider in den Psychol. Studien beschrieben werden.

[2]) Vgl. Külpe, Über die Objektivierung und Subjektivierung von Sinneseindrücken; Wundt, Philos. Stud., Bd. XX. (1902), S. 509 u. f.

keitsvermehrung »einschleichen«[1]) konnte. Das Schwanken der Aufstiegsschwelle ist endlich vielleicht noch durch eine verschiedene Stärke des Eigenlichtes bedingt; hierüber könnte eine bessere Ausbildung der Aufstiegsschwellenbestimmung Gewißheit verschaffen.

Gerade die Stärke des Eigenlichtes während jeder einzelnen Beobachtung verdient ein besonders hohes Interesse, denn das Eigenlicht ist für den Beobachter positiver Nachbilder im Dunkeln gleichsam die reagierende Fläche; seine Stärke steht also wahrscheinlich zur Helligkeit der positiven Nachbilder in funktioneller Beziehung. Eine exakte Methode zur Bestimmung der Eigenlichtstärke ist noch nicht ausgebildet. Nach Entlichtung der Helladaptationslampe war das Eigenhell am stärksten, und wenn die Bewegung der Augen stets gleichmäßig blieb, erschien es als gleichmäßiger, heller, weißlicher bis gelblicher Nebel. Der Beobachter ließ nun während der Helladaptation seinen Blick durch möglichst gleichmäßige, langsame Augenbewegungen auf dem vor ihm stehenden Feld nach oben und unten, nach rechts und links gleiten. Weil irgendwie hervortretende Punkte auf der sonst ganz gleichmäßig grauen Adaptationsfläche dazu anreizen fixiert zu werden, wird die Gleichmäßigkeit der Augenbewegung freilich erschwert. Aber wie die Gleichmäßigkeit des Lichtnebels nach Ausschaltung der Adaptationslampe (*ML*) zeigte, konnte sich der Beobachter eine genügend gleichmäßige Adaptation verschaffen; nach nur einer ruckartigen Bewegung der Augen zeigten sich im Lichtnebel besondere Gebilde. Wohl wegen ihres Einflusses auf das Eigenlicht sind ruckartige Augenbewegungen bei Nachbildversuchen zu vermeiden, wie dies schon Helmholtz forderte[2]). In wiederum recht gleichmäßiger, langsamer Augenbewegung ließ der Beobachter, während das Eigenlicht allmählich abnahm, seinen Blick nach dem Fixierpunkt wandern. Dieser erschien zunächst als ein Kreis mit verwaschenen Grenzen, größer und minder hell als her-

[1]) Schickt man durch den Nerven eines Nervmuskelpräparates einen schwachen galvanischen Strom, der noch nicht zu einer Muskelzuckung führt, und verstärkt den Strom allmählich, so kommt es zu einer Muskelzuckung erst bei einer weit höheren Stromstärke, als wenn die entprechenden galvanischen Ströme sogleich in ihrer vollen Stärke auf den Nerven wirken. Man pflegt bei der allmählichen Stromstärkensteigerung von »Einschleichen in den Strom« zu reden (Du Bois-Reymond). Vielleicht darf man hier einander ähnliche Vorgänge annehmen.

[2]) Helmholtz, Physiol. Optik², § 23, S. 504.

nach, wann das Eigenhell schwächer wurde und der Fixierpunkt scharf umgrenzt erschien, während der Lichthof um ihn herum abblaßte. Der Fixierpunkt pflegte zumeist in einem annähernd gleichen Zeitabstande vor der Primärreizdarbietung aufzutreten. Vermutlich war dann auch die Eigenlichtstärke in den Einzelbeobachtungen annähernd gleich. Wenn nämlich das Eigenlicht dem Beobachter besonders hell erschien und etwas länger als gewöhnlich dauerte (das geschah meist an sehr hellen Tagen, sowie ab und zu auch sonst), dann sprang der Fixierpunkt stets später als gewöhnlich scharf heraus. Geschah dies vor Auftreten des Primärreizes, so spielten sich die Erscheinungen wie gewöhnlich ab; wenn nicht, kam es überhaupt zu keiner rechten Helligkeitsbestimmung des positiven Nachbildes. Der Primärreiz erschien dann von einem sehr hellen Lichthof umgeben, der Lichthof blieb nach dem Schwinden des Primärreizes stehen und griff gleichsam in das sich nur schwach entwickelnde positive Nachbild hinein, so daß dessen Helligkeitsbeurteilung kaum noch möglich war, und die Beobachter enthielten sich dann des Urteiles.

In verschiedenen Versuchsreihen schwanken die Helligkeitswerte positiver Nachbilder, die in der nämlichen Weise erzeugt wurden so sehr, daß sie sich wie 100 : 210 (bei Biener), wie 100 : 340 (bei Goldschmidt), wie 100 : 370 (bei Schneider) und wie 100 : 300 (bei Dr. Tichý) verhalten. Über die Mittelwerte aus sämtlichen Versuchsreihen erheben sich die Schwankungen weit weniger, höchstens bis auf das Doppelte; unter die Mittelwerte sinken sie aber, wie dies die obigen Daten angeben, also bis auf ein Drittel; nach unten weichen demnach einzelne Werte von den Mittelwerten weit erheblicher als nach oben ab. Die Versuchsreihen, in denen die Helligkeiten der positiven Nachbilder besonders gering bewertet wurden, fanden zumeist an sehr hellen Tagen statt, und in der Regel beklagten sich die Beobachter während dieser Versuche über eine Verschiedenfarbigkeit von positivem Nachbild und Sekundärreiz, die den Helligkeitsvergleich sehr erschwere und vermutlich auch verändere. In den genannten Versuchsreihen, wie auch noch in ein paar anderen, in denen die Helligkeitsbewertung bestimmter positiver Nachbilder besonders gering war, finden sich zugleich Angaben über starkes Eigenlicht oder über die Schwierigkeit, den Fixationspunkt schnell

genug scharf zu erkennen, besonders während des ersten Teiles der Versuchsreihe; gerade dann erschien auch die Verschiedenfarbigkeit von Nachbild und Sekundärreiz, am stärksten und die Helligkeitsbewertung der positiven Nachbilder änderte sich während einer Versuchsreihe so, daß besonders differierende Werte für in nämlicher Weise ausgelöste positive Nachbilder nach Beobachtungen von Dr. Tichý sich wie 100 : 211 verhalten, während in den Versuchsreihen, die zu Ergebnissen führten, welche den Mittelwerten aus sämtlichen Versuchsreihen nahestehen, die Helligkeitsbewertung eines in bestimmter Weise ausgelösten positiven Nachbildes bei Dr. Tichý im Verlaufe einer Versuchsstunde um nur ± 16,6 % zu schwanken pflegt. Um die Frage nach dem Einfluß von Eigenlicht oder von Verschiedenfarbigkeit des positiven Nachbildes und des Sekundärreizes auf die Versuchsergebnisse beantworten zu können, mußten weitere Untersuchungen folgen. Es darf zunächst vermutet werden, daß die aus allen Versuchsreihen gefundenen Mittelwerte besonders dann für eine konstante Eigenlichtstärke gültig sind, wenn die Reihen, in denen über besonders starkes Eigenlicht geklagt wurde, von der Berechnung ausgeschlossen wurden. Die Berechnungen wurden einmal dementsprechend und einmal auf Grund sämtlicher Beobachtungsergebnisse durchgeführt.

Der Grad der Dunkeladaptation zur Zeit der Einzelbeobachtungen wurde durch Feststellung der Abstiegsschwellen bestimmt. Wenn die Dunkelzeiten, wie dies in den gewöhnlichen Versuchsreihen geschah, alle drei Minuten einander folgten, so sank die Anstiegsschwelle nach den Versuchsergebnissen der Beobachter Biener, Goldschmidt, Rehwoldt und Schneider im Verlaufe einer Versuchsstunde vom 4. bis zum 21. Versuch auf $^1/_1$ oder $^1/_2$. Dabei zeigten die Angaben der nach Tschermaks und Pipers Terminologie starken Adaptationstypen Biener, Goldschmidt und Schneider mit nur geringer Variationsbreite den höheren Empfindlichkeitszuwachs, die Angaben des schwachen Adaptationstypus Rehwoldt Gleichheit aller Empfindlichkeitswerte. Die angegebenen Werte ergaben sich in gleicher Weise, ob während der Dunkelzeiten stets Schwellenbestimmungen gemacht, oder ob auch einige Male Primär- und Sekundärreiz dargeboten wurden. Zudem wurde während einiger Versuchsreihen nur einem Auge während der Dunkelzeit ein Lichtreiz dar-

geboten (das andere unterdessen vorsichtig mit der hohlen Hand verdeckt) und so der übliche Nachbildversuch durchgeführt. Dann wurde in den nächsten Dunkelzeiten für jedes Auge besonders der Schwellenwert bestimmt. Zuvor war das Verhältnis der Schwellenwerte beider Augen festgestellt worden. Da nun nach Treitels[1]) und nach Pipers[2]) Ermittelungen die Adaptation jedes einzelnen Auges ganz unabhängig von der des anderen verläuft, bewies die in den Versuchen gefundene Konstanz des Verhältnisses der für die beiden Augen gefundenen Schwellenwerte, daß der Gesamtadaptationsverlauf durch Auftreten der Lichtreize während der Dunkelzeit nicht beeinflußt wird.

Erst vom 4. Versuche ab, oder nach zehn Minuten langer Adaptation auf die vor dem Beobachter stehende, hellbeleuchtete schwarze Papierwand zeigte die Dunkeladaptation während der Einzelbeobachtung eine im angegebenen Maße konstante Lage. Daher wurden in sämtlichen Versuchsreihen erst nach zehn Minuten langer Adaptation Helligkeitswerte der positiven Nachbilder protokolliert. In diesen ersten zehn Minuten wurden aber womöglich die drei Versuche in der üblichen Weise angestellt, damit sich der Beobachter stets wieder an den Rhythmus in der Erscheinungsfolge gewöhne; es wurde stets mindestens schon ein Versuch gemacht, damit die lokale Adaptation als in allen Versuchen konstant gelten konnte.

Wie genau die Hell-Dunkel-Adaptation während aller Einzelbeobachtungen konstant blieb, ergibt sich daraus, daß die Empfindlichkeitswerte während einer Versuchsreihe auf höchstens das Doppelte stiegen, während z. B. bei fortschreitender Dunkeladaptation von der 2. bis zur 62. Minute nach ihrem Beginn die Empfindlichkeit um 141084 % oder um 61665 % wächst[3]). Ob die geschilderten Adaptationsbedingungen für die Versuche genügen, läßt sich auf Grund der Stärke des Einflusses der Dunkeladaptation auf Erscheinen und Helligkeitswert eines positiven Nachbildes beurteilen. Zur Orientierung über die Stärke dieses Einflusses wurde in einigen Versuchs-

[1]) Treitel, Über das Verhalten der normalen Adaptation, Graefes Archiv für Ophthalmologie, Bd. XXXIII (1887), S. 73 u. f.

[2]) Piper, Über Dunkeladaptation, Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorg., Bd. XXI, S. 161 u. f.

[3]) Piper, Über Dunkeladaptation, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXXI (1903), S. 179 und 180, Tab. IV und X.

reihen statt nach je drei, nach je einer Minute mit einer Dunkelzeit begonnen; dann sank die Abstiegsschwelle beim Beobachter Rehwoldt auf $^1/_2$, bei den übrigen Beobachtern auf $^1/_6$ bis $^1/_8$, d. h., die Empfindlichkeit wuchs um 100 % oder um 500 % bis 700 %; unter den gleichen Umständen wuchs aber bei allen Beobachtern der Helligkeitswert eines in bestimmter Weise ausgelösten positiven Nachbildes um weniger als das Doppelte. — Ferner wurden mehrere Versuchsreihen nach einstündigem, vollkommenem Lichtabschluß durchgeführt; der erste Versuch schloß an die Zeit völliger Abdunkelung an, indem im entsprechenden Zeitpunkt, wo sonst die Helladaptationslampe entlichtet wurde, der Fixierpunkt auftrat, und indem die weitere Versuchsreihe ganz wie sonst durchgeführt wurde; die Helligkeitsbewertung eines bestimmten positiven Nachbildes war jedesmal im ersten Versuch, wie während der ganzen Versuchsreihe (innerhalb des üblichen Schwankungsbereiches), gleich dem Mittelwert aus sämtlichen Beobachtungen; sie war innerhalb des Schwankungsbereiches von $\pm$ 16,6 % bis $\pm$ 26,1 % in den ersten Versuchen meist am niedrigsten. — Nach einstündiger, sehr starker Helladaptation hingegen zeigten die Helligkeitswerte des positiven Nachbildes im Verlauf einer Versuchsreihe eine geringe Steigerung; der aus den ersten Versuchen sich ergebende Helligkeitswert war um nicht ganz 20 % niedriger, als der Mittelwert aus sämtlichen Beobachtungen. — Endlich zeigten in dem speziellen Falle einer sechsstündigen Versuchsreihe des Beobachters Dr. Tichý die Ergebnisse zu Beginn und zu Ende der Reihe, daß ein bestimmtes positives Nachbild gleich hell bewertet wurde. — Diese Vorversuche zeigen: Die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder steigt in sehr geringem Maße mit fortschreitender Dunkeladaptation (wenigstens unter den gewählten Versuchsbedingungen); und für die vorliegende Untersuchung ist die Adaptationslage bei allen Einzelbeobachtungen genügend konstant. Es genügte den Adaptationsverlauf während einer Versuchsstunde, trotz der mehrsemestrigen Dauer der Untersuchungen, einmal festzustellen; denn nach Pipers Ermittelungen[1]) bleibt der Schwellenwert (bei maximaler) Dunkeladaptation für dieselbe Person auch nach Monaten ziemlich konstant, und es ist anzunehmen: diese

[1]) Piper, Über Dunkeladaptation, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XXXI, S. 161 u. f.

Konstanz gilt für den Adaptationsverlauf unter den gewöhnlichen Bedingungen überhaupt. Zudem wurden die verschiedenen, über den Adaptationsverlauf orientierenden und gut untereinander übereinstimmenden Beobachtungen zu ganz verschiedenen Zeiten gemacht, und gerade weil sich mit einer starken Änderung des Adaptationsgrades die Nachbildhelligkeit nur sehr wenig ändert, genügen die geschilderten Bestimmungen des Adaptationsverlaufes während einer Versuchsstunde für die vorliegende Untersuchung vollkommen.

Die Konstanz der lokalen Adaptationslage wird nicht schon dann gewährleistet, wenn »bei sorgsamer Beobachtung des verdunkelten Gesichtsfeldes ein Nachbild nicht mehr bemerkt wurde«[1]), und wenn auch nach der Einwirkung ganz schwachen diffusen Lichtes keins mehr sichtbar wird, sondern es könnte die lokale Adaptation infolge der letzten Reizung noch verändert sein, ohne daß diese Veränderung aufgefaßt würde und sich anders erkennen ließe, als durch ihren Einfluß auf einen an der nämlichen Stelle sich abspielenden Vorgang. Wenn von Versuch zu Versuch trotz der dazwischenliegenden, $168 \cdot 1000\ \sigma$ dauernden, Helladaptation ein solcher Einfluß ausgeübt würde, so würde er in einer Versuchsreihe entweder vom zweiten Versuche ab sich in gleicher Weise geltend machen, oder es würden sich seine Wirkungen mit der Zahl der Versuche steigern. Die erwähnte, während sechs Stunden durchgeführte, Versuchsreihe zeigt aber am Schluß die nämliche Helligkeitsbewertung eines bestimmten positiven Nachbildes wie zu Beginn. Und die während der ersten zehn Minuten einer Versuchsreihe gefundenen Ergebnisse, mithin auch das des ersten Versuches, wurden aus den Hauptversuchsergebnissen ohnedies gestrichen (weil erst nach diesen zehn Minuten die dem einzelnen Versuch vorausgehende Helladaptation als stets gleich angesehen werden durfte). Somit ist die Ausgangslage der lokalen Adaptation als für jeden protokollierten Einzelversuch konstant anzusehen.

[Konstanz der chromatischen Adaptation.] Die geschilderten Versuchsreihen über die Konstanz der Hell-Dunkeladaptation führten zu ihren Ergebnissen nur, wenn positives Nachbild und Sekun-

[1]) Damit hielt Martius das Auge für genügend erholt, um einen neuen Versuch beginnen zu dürfen — Martius, das Gesetz d. Helligkeitswertes d. negat. Nachbildes; Beitr. z. Psychol. u. Philos., Bd. I, Heft 1 (1896), S. 53.

därreiz farblos erschienen. Die Primärreizfläche, das positive Nachbild und die Sekundärreizfläche erschienen zumeist farblos; an sehr hellen Sommertagen aber, zumal wenn der Beobachter gerade aus dem Freien kam, erschien die Primärreizfläche zwar fast farblos oder nur schwach gelblich, das positive Nachbild blaß und farblos, der Sekundärreiz aber orangegelblich. Das Licht einer Bogenlampe mit gewöhnlichen Kohlen erschien im Dunkelzimmer bläulich (neben Tageslicht erscheint es gelblich); die Milchglasplatten absorbieren ein wenig selektiv blaue und grüne Strahlen. Diese selektive Absorption ist durch die beiden Milchglasplatten (QQ' und KK') vor der Sekundärreizfläche stärker als vor der Primärreizfläche durch die eine Milchglasplatte (KK'). Mag nun an sehr hellen Tagen die Unterschiedsempfindlichkeit für Farbentöne überhaupt besonders groß sein, und mag deshalb der Unterschied zwischen der Farblosigkeit des positiven Nachbildes und dem Farbenton des Sekundärreizes sich an hellen Tagen geltend machen, oder mag an diesen Tagen die chromatische Adaptation eine besonders große Empfindlichkeit für gelbrote Strahlen bedingen und deswegen der Unterschied zwischen der Farblosigkeit des positiven Nachbildes und der Orangegelblichkeit des Sekundärreizes sich zur Auffassung drängen, mag durch eine Änderung der chromatischen Adaptation sich der Nachbildverlauf selbst modifizieren, oder mag unter den geschilderten Umständen durch andere, durch sie mitbedingte Faktoren, etwa durch ihren Einfluß auf das Eigenlicht der Netzhaut, die Helligkeit eines positiven Nachbildes beeinflußt werden, — sobald der Sekundärreiz einen gelblichroten Farbenton erhielt, wurde meistens ein minder heller Sekundärreiz als sonst mit einem bestimmten positiven Nachbilde gleich hell bewertet. In einigen Versuchsreihen wurde zwar dem nämlichen Vergleichsreiz ein bestimmtes positives Nachbild auch an sehr sonnigen Tagen gleich hell bewertet, wie an hellen und selbst an dunklen Tagen, viel häufiger zeigte sich aber an sehr hellen Tagen das abweichende Ergebnis; in einer Reihe einzelner Fälle, wo die Beobachter aus dem sommerlichen Mittagssonnenschein zu den Versuchen kamen, waren die einem bestimmten positiven Nachbilde gleich hell geschätzten Sekundärreize bei Biener bis auf 100/210, bei Goldschmidt bis auf 100/340, bei Schneider bis auf 100/370 und bei Dr. Tichý bis auf 100/300 gegenüber den an minder hellen

Tagen herabgemindert. Hier zeigen sich erhebliche individuelle Unterschiede, deren Größen sich untereinander nicht so verhalten wie die Größen der Schwankungsbereiche in der Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder bei einzelnen Beobachtern (nämlich ± 26,1 % bei Biener, ± 19,3 % bei Goldschmidt, ± 20,4 % bei Schneider und ± 16,6 % bei Dr. Tichý). Wenn die Beobachter ein bestimmtes positives Nachbild (ohne das Messungsergebnis zu kennen) einem minder hellen Vergleichsreiz gleich hell schätzten, beklagten sie sich meistens über die unangenehme Färbung des Sekundärreizes, von der zu abstrahieren sehr schwierig sei, und die eine Helligkeitsvergleichung von Sekundärreiz und positivem Nachbild sehr unsicher mache. An solchen Versuchstagen nun änderte sich die Vergleichung während einer Versuchsreihe ausnahmslos in der Richtung, daß am Schlusse der Reihe einem bestimmten positiven Nachbild ein hellerer Vergleichsreiz gleichgeschätzt wurde als zu Beginn der Reihe; und wenn zu Beginn die Abweichung nicht allzu groß war und die Versuchsreihe lange genug dauerte, wurde zum Schluß für Nachbild- und Vergleichsreizhelligkeit eine Gleichung gefunden, die mit der als Mittelwert aus den Beobachtungen des bestimmten Nachbildes an nicht zu hellen Tagen berechneten Gleichung (innerhalb des gewöhnlichen Schwankungsbereiches) übereinstimmte. In einer einzelnen derartigen Versuchsreihe verhalten sich die differierendsten Helligkeitsbewertungen wie 100:167 (bei Biener), wie 100:247 (bei Goldschmidt), wie 100:293 (bei Schneider) und wie 100:211 (bei Dr. Tichý); selbst in drei aufeinanderfolgenden Versuchen, in denen der Sekundärreiz farbig erschien, schwankten die Werte so, daß sie sich wie 100:192 (bei Biener), wie 100:135 (bei Schneider) und wie 100:117 (bei Dr. Tichý) verhalten. Die Helligkeitsvergleichung des positiven Nachbildes mit dem Sekundärreize wurde also, ganz entsprechend den Vermutungen der Beobachter, sehr viel ungenauer als sonst, sobald der Sekundärreiz farbig erschien; einem bestimmten Nachbilde wurde dann eine andere Helligkeit gleichgeschätzt. Beides geschah unter besonderen Bedingungen, die vermutlich in irgendeiner Weise mit der Tageshelligkeit zusammenhängen; als spezielle Versuchsbedingungen interessieren sie an sich hier zunächst nicht, sondern nur insofern, als sie in der allgemeinen Untersuchung auszuschalten sind. Deswegen brauchte die Frage nach dem Verlaufe der chromatischen Adaptation

während der Versuchsstunde gar nicht beantwortet zu werden. Was auf diesen Verlauf von Einfluß ist, brauchte für die vorliegende Untersuchung nicht näher erforscht zu werden, es genügte, einfach für die Mittelwertberechnungen diejenigen Versuchsergebnisse auszuscheiden, wo der Sekundärreiz andersfarbig als das positive Nachbild erschienen war.

Freilich bedarf es noch einer besonderen Voraussetzung zur Bestimmung der Grenze, wo der Sekundärreiz farblos und wo er farbig erschien, welche Versuche mithin auszuschalten seien. Wenn nämlich gerade auf den Farbenton des Sekundärreizes die Aufmerksamkeit gerichtet wurde, erschien er fast nie vollkommen farblos. Bei den Versuchen der gestellten Aufgabe aber befand sich die Helligkeit des Sekundärreizes im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit; und der Farbenton mußte bei einer bestimmten Aufmerksamkeit einen vermutlich ebenfalls bestimmten Sättigungsgrad übersteigen, um sich zur Apperzeption drängen zu können. Nun soll ohnehin die Aufmerksamkeit (um für die Versuchsergebnisse gleichsam ein konstanter Faktor zu sein) in allen einzelnen Versuchen als gleich bestimmt gelten können. Vermutlich ist ferner bei einer gleichen Aufmerksamkeit auch der Sättigungsgrad, bei dem gerade ein Farbenton sich zur Auffassung drängen kann, als bestimmt anzunehmen. Nur wie genau diese Bestimmtheit ist, dürfte als fraglich gelten. Die Lösung dieser Frage ist aber eine, dazu noch umfangreiche Aufgabe für sich. Um die Frage zu umgehen, wurden bei den Berechnungen von Mittelwerten aus den Helligkeitswerten bestimmter Nachbilder einmal alle die Beobachtungen ausgelassen, wo im Protokoll der Sekundärreiz als farbig vermerkt war, und einmal wurden sämtliche Beobachtungen in Rechnung gezogen, und es sollten durch die Menge von Beobachtungen Abweichungen infolge spezieller Bedingungen zu annäherndem Verschwinden gebracht werden. Bei fast allen Versuchsreihen, in denen der Sekundärreiz als farbig notiert war, enthalten die Protokolle auch besonders starkes Eigenlicht vermerkt, so daß zumeist schon aus letzterem Grunde die Versuchsreihen für eine Berechnung ausgeschaltet wurden. Deswegen wurden im ganzen nur zweierlei Berechnungen durchgeführt: einmal wurden sämtliche Versuchsergebnisse verwertet, und das andere Mal wurden die Reihen, in denen sich Angaben über besonders starkes Eigenlicht finden, und in denen

der Sekundärreiz als farbig notiert war, ausgeschaltet. Die große Ähnlichkeit der so erhaltenen Resultate rechtfertigt das Verfahren (vgl. die Kurven $\times$ und $+$ in Fig. 6 und 7, S. 231).

Die Zahl der Beobachtungen, in denen positives Nachbild und Sekundärreiz verschiedenfarbig erschienen, hätte sich verringern lassen können, wären Primär- und Sekundärreiz, wenn schon infolge einer besonderen chromatischen Adaptation nicht ganz farblos, so doch ganz gleichfarbig dargeboten worden. Damit hätte sich aber nur sehr wenig erreichen lassen, denn Primär- und Sekundärreiz sind sehr angenähert gleichfarbig, und stets würde das positive Nachbild nach einem farbigen Primärreiz nur abgeblaßt in dessen Farbenton erscheinen, also nicht wie ein dem Primärreiz gleichfarbiger Sekundärreiz; wenn dieser dem Nachbild gleichfarbig erscheinen sollte, hätte er entsprechend der jeweiligen chromatischen Adaptation in seinem Farbenton geändert werden müssen; das hieße aber mit einer neuen Untersuchungsweise zu einer neuen Fragestellung die gestellte Aufgabe belasten.

Damit die Aufmerksamkeit des Beobachters in allen Versuchen als möglichst konstant gewährleistet sei, wurde jede Störung während einer Versuchsreihe vermieden, aber ruhige Unterhaltung während der fast drei Minuten dauernden Helladaptationszeit wurde zur Vermeidung einer ermüdenden Langweilung des Beobachters nicht ausgeschlossen, und vor allem folgten die Geschehnisse in den einzelnen Versuchen einander in so konstantem und so leicht auffaßbarem Rhythmus, daß der Beobachter sich bald an diesen Rhythmus gewöhnte und danach seine Aufmerksamkeit einzustellen lernte. Ganz besonders hierdurch wurde eine Konstanz der Aufmerksamkeit während der einzelnen Versuche bewirkt[1]). Ferner schützte dies den Beobachter vor einer gesundheitlichen Schädigung durch die Versuche, da er so nicht etwa angeleitet wurde, immer auf Nachbilder zu achten und dann auch außerhalb der Versuchsstunden allzuhäufig Nachbilder wahrzunehmen[2]). Tatsächlich bemerkte unter den Beobachtern nicht ein einziger trotz der sehr zahlreichen Versuche

[1]) Vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[6], Bd. I, S. 583.

[2]) Vgl. Wirth, a. a. O., S. 492.

irgendwelche Schädigung seiner Augen, wie häufiges Nachbildersehen oder gar Schmerzen.

In dem Moment, wo der Hebel des Zeitsinnapparates zurückgestoßen wurde, um das Gewicht fallen zu lassen, wurde »jetzt« gerufen, dann hörte der Beobachter das gleichmäßige Schnurren des Zeitsinnapparates, nach einem bestimmten Intervall wurde es dunkel, der Beobachter hatte es gelernt, dann ruhig den Fixierpunkt zu suchen, nach einem bestimmten Intervall erschien der Reiz, eine bestimmte kurze Zeit später hörte der Beobachter das Anschlagen des eisernen Ankers vom Berlinerschen Pendel am Magneten M^2, wiederum nach einem bestimmten Intervall erschien der Sekundärreiz, und eine bestimmte kurze Zeit hinterher hörte der Beobachter den eisernen Anker an den Magneten M^1 anschlagen; während der ganzen Zeit schnurrte der Zeitsinnapparat gleichmäßig, und bis es wieder hell wurde, hatte der Beobachter Zeit, sein Urteil über den Helligkeitswert des positiven Nachbildes im Vergleich zum Sekundärreiz zu bilden. Wenn die während der Beobachtung auftretenden Geräusche das Beobachten erschweren sollten[1], so war diese Erschwerung doch in allen Versuchen konstant; daß durch sie die Helligkeitsschätzung in ihrer Abwertung beeinflußt werden konnte, ist nicht einzusehen. Daher darf ein etwaiger Einfluß der Geräusche auf die Ergebnisse der Beobachtungen (vielleicht nicht auf deren Schwankungsbereich) als eliminiert gelten. Ein ungefährer Anhalt für die Konstanz der Aufmerksamkeit war dadurch gewährleistet, daß bei einer Aufmerksamkeitsschwankung die etwas schwierige starre Fixation vom Fixierpunkt F nicht festgehalten wurde; eine solche Fixierschwankung bemerkte der Beobachter aber stets, denn entsprechend der Blickbewegung bewegte sich das Nachbild. (Ungeübte Beobachter behaupteten manchmal, daß sie vollkommen starr fixiert hätten und beschrieben den Spaziergang, den das positive Nachbild während der Beobachtung gemacht hätte.) Starre Fixation ist schon wegen gleichmäßiger Apperzeption von Nachbild und Sekundärreiz nötig. Sie läßt sich natürlich um so leichter durchhalten, je kürzer sie währt, auch aus diesem Grunde war die Wahl kurzdauernder

[1] Vgl. Stern, Die Wahrnehmung von Helligkeitsveränderungen (beeinflußt durch gleichzeitig auftretende Geräusche): Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorg., Bd. VII (1894), S. 262 u. f.

Lichtreize für die Untersuchung am geeignetsten. Freilich mögen bei langer Fixationsdauer die wohl meist vorkommenden, verhältnismäßig kurzdauernden Blickschwankungen nicht sehr in Betracht kommen. Diese Möglichkeit müßte aber erst als Tatsache erwiesen werden. Wenn die Aufmerksamkeitsschwankung sehr erheblich war, erschien das positive Nachbild überhaupt nicht, das geschah aber bei geübten Beobachtern fast nur, wenn sie ermüdet waren, besonders wenn sie sich optisch sehr angestrengt hatten. Sobald während einer Beobachtung eine Blickschwankung vorkam, wurde sie im Protokoll vermerkt, und für die Berechnung galt ein solcher Versuch als gestrichen. Das positive Nachbild hatte nach einer Blickschwankung stets verwaschene Ränder, seine Helligkeitsbewertung war gleich oder geringer als sonst in derselben Versuchsreihe, niemals aber größer.

Im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit, sollte all das und nur das stehen, was zur Helligkeitsbewertung der positiven Nachbilder aufgefaßt werden mußte. Nur noch eine Erscheinung konnte bei der geschilderten Versuchsweise zur Beobachtung gelangen, nämlich die Bewegung des Sektors vom Berlinerschen Pendel. Dem Beobachter wurde der linke Teil des Primärreizfeldes um wenige σ eher dargeboten, als der rechte, und entsprechend die gleiche Zeit früher wieder verdunkelt. (Der Lichtreiz darf trotzdem als ein ruhender angesehen werden.) Die Beobachter haben mit einer einzigen Ausnahme eine Bewegung des Pendelsektors niemals wahrgenommen; und für eine leichte Entscheidung der Frage, ob diese eine Ausnahme berücksichtigt werden müsse, trifft es sich gut, daß der eine Beobachter die Pendelbewegung im gerade umgekehrten Sinne zu sehen glaubte, als wie sie wirklich stattfand. Es ist also ausgeschlossen, daß die Pendelsektorbewegung in störender Weise sich in der Auffassung geltend mache, und auch, daß etwa infolge ihrer Wahrnehmung regelmäßige Blickschwankungen aufträten.

Daß Erinnerungsbilder an frühere Versuche die Helligkeitsbewertung der positiven Nachbilder, oder überhaupt das Helligkeitsapperzipieren in den Versuchen beeinflußten, durfte wegen der er-

fahrungsgemäß sehr geringen Deutlichkeit von Helligkeitserinnerungen[1]) von vornherein als unwahrscheinlich gelten. Um aber nicht während der Hauptversuchsreihen durch Anfragen die Aufmerksamkeit des Beobachters gerade auf solche Erinnerungsbilder zu lenken, wurden erst am Schluß sämtlicher Versuchsreihen, wo durch eine Übung von 57, 14, 83 und 104 Versuchstagen diese Erinnerungsbilder am deutlichsten hätten sein müssen, von den Beobachtern Biener, Dr. Salow, Schneider und Dr. Tichý Urteile über das Verhältnis der im letzten Versuche beobachteten Helligkeiten zu den entsprechenden des vorletzten Versuches gesammelt. In solchen Versuchen wurde der gewohnte Vergleich von positivem Nachbild mit Sekundärreiz durchgeführt, und daneben gewöhnlich höchstens eine der im Versuche gesehenen Helligkeiten mit der entsprechenden des vorhergehenden Versuches verglichen; auch das war schon schwierig, und oft gab ein Beobachter übellaunig zu Protokoll: »man kann doch nicht auf alles achten«. In den vorliegenden Angaben aber zeigte sich, daß der Unterschied einer Helligkeit gegen die entsprechende des vorhergehenden Versuches bei dem hierfür geübtesten Beobachter Dr. Salow und bei möglichst großer Konzentration der Aufmerksamkeit auf den Gedächtnisversuch erst bei einer objektiven Änderung auf das mindestens 1,625fache bemerkt wurde; meistens indeß blieben Helligkeitsunterschiede bei einer Reizstärkenänderung bis auf das 13fache, manchmal sogar bis auf das 40fache unbemerkt. Als z. B. einmal Primärreize von 6,06 MLm und 244 MLm abwechselnd einander folgten, schätzte Dr. Tichý die positiven Nachbilder (mit einem Schwankungsbereich von $\pm$ 14,2 %) Sekundärreizen von 0,441 MLm und 0,669 MLm gleich; dabei stiegen also die Primärreizstärken in zwei einander folgenden Versuchen auf das 400fache oder sie sanken auf ein 400tel, während die Helligkeitswerte der durch sie ausgelösten positiven Nachbilder sich im Verhältnis 441 : 669 oder umgekehrt änderten, und dennoch waren die Angaben über die von Versuch zu Versuch stattfindenden Helligkeitsänderungen der Primärreize nur in 58 % der Fälle richtig: »heller«, aber in 33 % der Fälle: »gleich« und in 9 % der Fälle sogar: »dunkler«. Die Deutlichkeit des Erinnerungsbildes eines Primärreizes ist also schon bis zum nächst-

[1]) Vgl. Wirth, Der Fechner-Helmholtzsche Satz..., Wundt, Philos. Stud., Bd. XVI, S. 480.

folgenden Versuch sehr gering, und die Helligkeit eines positiven Nachbildes wird etwa 4,4 bis 275 mal genauer geschätzt als die eines Erinnerungsbildes. Außerdem wurde mit der Stärke der dargebotenen Primärreize in jeder Versuchsreihe sehr häufig, mindestens viermal, mit den dargebotenen Sekundärreizen nach fast jedem Versuche gewechselt; es folgten einander also auch verschieden hell bewertete Nachbilder (ohne daß dabei die Änderung in der Stärke der sie auslösenden Reize bemerkt zu werden pflegte). Endlich zeigte es sich als für die Ergebnisse vollkommen belanglos in welcher Reihenfolge die einzelnen Stufen der Primärreize und Sekundärreize gegeben wurden, insbesondere auch, ob die Versuchsreihe mit einem starken oder schwachen Primärreiz begonnen wurde. Es brauchen nach alledem für die Urteilsbildung über die Helligkeit der positiven Nachbilder etwaige Erinnerungsbilder zuvor beobachteter positiver Nachbilder nicht mit in Rechnung gezogen zu werden. Hierfür spricht auch die Tatsache, daß die Helligkeitsbewertungen positiver Nachbilder, die in bestimmter Weise ausgelöst wurden, auch nach 14wöchigem Aussetzen der Versuche den viel später folgenden und den der Unterbrechung vorausgehenden schon in der zweiten bis fünften Versuchsstunde gleich waren; in dieser Frist wurde die zu den Beobachtungen nötige Übung im Fixieren wieder gewonnen.

Trotz der Ungenauigkeit der einzelnen Erinnerungsbilder ist es denkbar, wohl sogar wahrscheinlich, daß bei den langen Reihen von Versuchen die vielen Einzeldarbietungen zu einem Gesamterinnerungsbild führen. Und es wäre weiter denkbar, daß den Gesamterinnerungsbildern, die gemäß ihrer Zusammensetzung aus Einzelbildern sämtlicher positiver Nachbilder und sämtlicher Sekundärreize wohl ungefähr die durchschnittliche Helligkeit der positiven Nachbilder und der Sekundärreize haben, die in jedem einzelnen Versuch neu auftretenden Helligkeitsempfindungen assimiliert, daß also starke Helligkeitsempfindungen geringer, schwache stärker bewertet würden. Würde aber ein Assimilationsvorgang dieser Art stattfinden, so müßte er sich wahrscheinlich im Laufe der Versuchsreihen immer mehr ausbilden, sich also wie ein Übungsfaktor Geltung verschaffen. Das konnte indes bei keinem Beobachter in der Folge der Versuchsreihen festgestellt werden. Eine Übung gewannen die Beobachter überhaupt nur darin, daß sie mit größerer Sicherheit zu fixieren, und

besser die Aufmerksamkeit zu konzentrieren lernten. Infolgedessen zeigten die gefundenen Helligkeitswerte mit fortschreitender Übung nur eine wachsende Genauigkeit, und die Höhe der Helligkeitswerte zeigte sich von einer Übung vollkommen unabhängig. (Die Meinung des Beobachters, daß er in bestimmten Einzelfällen sich ein besonders gutes Urteil gebildet habe, entsprach nicht immer der wirklichen Genauigkeit dieser Bestimmungen, bei einzelnen Beobachtern sogar sehr selten.) Die Zahl der wegen Blickschwankungen verfehlten Versuche nahm mit fortschreitender Übung immer mehr ab. Die größtmögliche Übung wurde von zuvor im Fixieren und im Wahrnehmen von Nachbildern ungeübten Beobachtern nach drei bis fünf Wochen erreicht und wurde auch nach einer Unterbrechung der Versuche von 14 Wochen schon in der zweiten bis fünften Versuchstunde wieder gewonnen. — Ein Beobachter, der in der Betrachtung von Nachbilderscheinungen überhaupt, sowie im Fixieren des Auges eine so große Übung mitbrachte, daß schon seine zweite Versuchsreihe zu brauchbaren Messungsergebnissen der Helligkeit positiver Nachbilder führte, Herr Prof. Wirth, machte dabei Angaben, wie andere Beobachter nach langer Übung. Es können also etwa sich bildende Gesamterinnerungsbilder so wenig, wie Erinnerungsbilder überhaupt, die Versuchsergebnisse in irgendeiner Richtung beeinflussen.

Nach den Daten über die Versuchsanordnung konnte die Stärke der dargebotenen Primärreize im ungünstigsten Fall mit maximalen Fehlern von + 11,4 % und — 10,6 %, ihre Dauer mit einem maximalen Fehler von ± 9,7 %, und die Zeit vom Eintritt der Dunkelheit bis zum Auftreten des Primärreizes mit einem maximalen Fehler vom ± 0,2 % genau bestimmt werden. Es wurden in einer längeren Versuchsreihe abwechselnd zwei Primärreize von 30,5 MLm und 37,5 MLm 253 σ und 310 σ lang dargeboten: deren Stärke differierte um 24 ± 11 %, deren Dauer um 19 ± 1 %. Die Zeit vom Eintritt der Dunkelheit bis zu ihrem Auftreten betrug 2558 σ und 2861 σ, zeigte also einen Unterschied von 1,2 %; würden die erwähnten bei der Versuchsanordnung möglichen Schwankungen das Ergebnis der Untersuchung merklich beeinträchtigen, so müßte sich

bei den noch größeren Unterschieden ein Einfluß deutlich zeigen; die Ergebnisse zeigen aber keine größeren Verschiedenheiten, als bei konstanter Darbietung des nämlichen Primärreizes.

Die Stärke der Sekundärreize konnte nach den Daten über die Versuchsanordnung mit maximalen Fehlern von + 11,9 % und — 10,9 %, ihre Dauer mit dem maximalen Fehler von ± 1 %, von ± 2,5 σ auf 310 σ oder 346 σ, dargeboten werden. Die maximale Differenz in der Darbietungsdauer der Reize darf außer acht gelassen werden, denn sämtliche Hauptversuchsreihen wurden mit einem 310 σ und mit einem 346 σ dauernden Sekundärreiz durchgeführt, ohne daß die Ergebnisse Abweichungen bestimmter Richtung erkennen ließen. Zur Entscheidung der Frage, ob die Reizstärke mit genügender Genauigkeit dargeboten wurde, war festzustellen, wie genau die Helligkeitsbewertung eines positiven Nachbildes möglich ist. Nach den Angaben über die Disposition des Beobachters darf es als ausgeschlossen gelten, daß die dispositionellen Faktoren stets in bestimmter Richtung wirkten. Ihre Wirkungen können einander also nicht stets aufheben und müssen in einer genügend langen Versuchsreihe sämtlich zur Geltung kommen. Die Schwankungen in den Helligkeitseinschätzungen eines in möglichst konstanter Weise bestimmten positiven Nachbildes während einer solchen Versuchsreihe geben daher ein Maß für die Genauigkeit dieser Helligkeitsschätzungen. In den Versuchsreihen des Beobachters Dr. Tichý, dem die genauesten Angaben zu verdanken sind, zeigen die durch ein Gleichheitsurteil bestimmten Helligkeitsbewertungen von mehr als fünfmal in der nämlichen Weise erzeugten positiven Nachbilder Schwankungen von mindestens ± 14,2 %, durchschnittlich aber von ± 16,6 %. Z. B. betragen die Schwankungen der 7, 8 und 11 Helligkeitsbewertungen in drei Versuchsreihen, die besonders geringe Schwankungen zeigen, bis zu ± 14,2 %, ± 18,5 % und ± 17,3 %. Mithin ist die Helligkeitsmessung des Sekundärreizes im ungünstigsten Falle, der sich denken läßt, 14,2/11,9 mal genauer, als die Helligkeitsbewertung des positiven Nachbildes. Damit ist der letzte Beitrag zu dem Nachweis erbracht, daß die Versuchsanordnung den an sie zu stellenden Forderungen genügt.

VI. Die Ergebnisse der Hauptversuchsreihen.

Die Vorversuche wurden in der geschilderten Weise zunächst mit einem 41,3 MLm starken und 110 σ dauernden Reize angestellt. Die Helligkeitsbewertung des positiven Nachbildes hatte dabei in 336 und in 432 Einzelbeobachtungen von Dr. Tichý den Mittelwert 0,681 MLm und 0,710 MLm. In den einzelnen Versuchsreihen dieses Beobachters betrugen die Schwankungen der gefundenen Werte, sobald sie genügend zahlreich waren, durchschnittlich $\pm$ 16 % um den als arithmetisches Mittel auf Grund sämtlicher Gleichheitsurteile berechneten Mittelwert herum[1]); die Schwankungen der Mittelwerte verschiedener Versuchsreihen betrugen gewöhnlich etwas mehr, manchmal erheblich weniger, bisweilen verhalten sich aber die differierenden Werte wie 1 : 3, bei allen anderen Beobachtern waren diese Schwankungen der Versuchsergebnisse noch größer.

Weil die aus den Helligkeitsbewertungen eines in möglichst konstanter Weise erzeugten positiven Nachbildes für einzelne Versuchsreihen berechneten Mittelwerte erhebliche Schwankungen zeigten, war es nicht angängig, die Sekundärreize in einer für die Berechnung der Versuchsergebnisse wünschenswerten Weise auszuwählen; sie konnten nicht in gleichen Abständen variiert werden, und die verschiedenen Sekundärreize ließen sich nicht sämtlich mehrmals und gleich häufig darbieten.

Welche Sekundärreize gegeben wurden, war vielmehr durch die Forderung bestimmt, daß der Helligkeitswert des positiven Nachbildes in jeder einzelnen Versuchsreihe möglichst genau festgestellt werde, daß also obere und untere Grenze der dem positiven Nachbilde gleichgeschätzten Sekundärreize gefunden werden. Das hatte nun mit Hilfe einer verhältnismäßig geringen Zahl von Einzelbeobachtungen zu geschehen. Denn in jeder einzelnen Versuchsreihe waren durch nur 17 Helligkeitsvergleiche für mindestens zwei verschiedene in jeweils bestimmter Weise ausgelöste positive Nachbilder die Helligkeitswerte zu bestimmen, damit aus deren Relationen trotz der Höhe der an verschiedenen Tagen vorkommenden absoluten Schwankungen Schlüsse gezogen werden könnten. Hierdurch wurde es auch unmöglich, dem

[1]) Vgl. o. S. 202 und 219.

Prinzip der großen Zahlen, das bei der in vorliegender Untersuchung angewandten Abzählungsmethode berücksichtigt werden muß [1]), während einer einzelnen Versuchsstunde gerecht zu werden, und es war für jede Bestimmung eine ganz ungewöhnlich große Zahl von Versuchsstunden zur Gewinnung der notwendigen Einzelbeobachtungen erforderlich. Wie der Experimentator seiner Aufgabe gerecht zu werden suchte, indem er gleichsam von Versuch zu Versuch die Unterschiede der Sekundärreizhelligkeit zum Helligkeitswert des positiven Nachbildes einschränkte, zeigt beispielsweise die folgende Versuchsreihe:

Beobachter: Dr. Tichý.

Befinden: wohl, Augen nicht besonders angestrengt, tagsüber noch nicht geraucht.

Experimentator: Goldschmidt.

Tageshelligkeit: Hell [2]).

27. Juni 1908. Adaptationsbeginn: 3 Uhr 2 Min. Beginn der Versuche: 3 Uhr 6 Min.

Zeit	und Art des Versuches. Primärreizstärke.	Ergebnis. Nachbildhelligkeit. (Stärke des Sekundärreizes.)
3 Uhr 6 Min.	37,9 MLm	—
3 „ 9 „	37,9 „	—
3 „ 12 „	37,9 „	⩽ [3]) 0,914
3 „ 15 „	37,9 „	< 0,763
3 „ 18 „	37,9 „	⩾ 0,525
3 „ 21 „	6,05 „	< 0,525
3 „ 24 „	6,05 „	> 0,326
3 „ 27 „	6,05 „	> 0,408
3 „ 30 „	37,9 „	< 0,632
3 „ 33 „	37,9 „	⩾ 0,550
3 „ 36 „	37,9 „	> 0,617
3 „ 39 „	37,9 „	> 0,632
3 „ 42 „	37,9 „	= 0,690
3 „ 45 „	6,05 „	> 0,420
3 „ 48 „	6,05 „	= 0,461
3 „ 51 „	6,05 „	= 0,525
3 „ 54 „	244 „	> 0,914
3 „ 57 „	244 „	= 0,998
4 „ 0 „	244 „	= 0,936

[1]) Vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[6], Bd. I, S. 601.

[2]) Die Tageshelligkeit wurde nach vier Stufen abgeschätzt: Sehr hell, hell, dunkel, sehr dunkel.

[3]) Notiert wurden die Urteile: deutlich merklich heller als (⩾); eben merklich heller als (>); gleich (=); eben merklich dunkler als (<) und deutlich merklich dunkler als (⩽).

Die Art, wie die Sekundärreize einander folgen, wurde in den verschiedenen Versuchsreihen erheblich variiert; dazu bot sich besonders dann Gelegenheit, wenn zufällig schon zu Beginn einer Versuchsreihe der Beobachter ein Gleichheitsurteil abgegeben hatte. Die Mittelwerte der gefundenen Ergebnisse zeigen sich von der Art der Sekundärreizfolge vollkommen unabhängig, ebenso davon, ob zu Beginn der Versuchsreihe geringe oder große Sekundärreizhelligkeiten dargeboten wurden. In fast jeder Versuchsreihe wurden mehrere Kontrollversuche (Vexierversuche) angestellt.

Gelegentlich des Zufalls, daß schon zu Beginn einer Versuchsreihe die Sekundärreizhelligkeit dem positiven Nachbilde gleich hell erschien, wurden manchmal unter Konstanz der Bedingungen für das Nachbilderscheinen die Sekundärreize in gleichen Abständen variiert und z. T. mehrmals dargeboten, so daß nach dem von Klemm[1]) angewandten Verfahren aus einer Anzahl derartiger Versuchsreihen approximative Unterschiedsschwellen bei Helligkeitsbewertung des positiven Nachbildes sich berechnen ließen. Die so bestimmten Schwellenwerte sollen bei Besprechung der Hauptversuchsreihen, die zur Bestimmung der Nachbildhelligkeiten führten, wiedergegeben werden, weil sie dort von Interesse sind. Zuvor ist weiter zu berichten, unter welchen Bedingungen die Hauptversuchsreihen gewonnen wurden.

Wie in der oben geschilderten Versuchsstunde strebte der Experimentator stets danach, zu einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der »Gleich«-Urteile und zu einer möglichst gleichen Zahl von »Eben merklich dunkler-« und »Eben merklich heller«-Urteilen die Gelegenheit zu geben. Das arithmetische Mittel der sämtlichen einem in konstanter Weise erzeugten positiven Nachbilde gleichgeschätzten Helligkeiten darf als Mittelwert für dessen Helligkeitsbewertung gelten. Von dem so gefundenen Mittelwerte weicht das arithmetische Mittel aus den beiden arithmetischen Mitteln der sämtlichen einem in konstanter Weise erzeugten positiven Nachbilde gegenüber als »eben merklich heller« und als »eben merklich dunkler« beurteilten Helligkeiten nur wenig ab. Deswegen wurden zur Darstellung in den Kurven (Fig. 6 und 7, S. 237) beide Mittelwerte benutzt.

[1]) O. Klemm, Lokalisation von Sinneseindrücken bei disparaten Nebenreizen, Wundt, Psychol. Stud., Bd. V, Heft 1 und 2, S. 93 u. f., insbesondere S. 98 ff.

Deren Abstand voneinander mag als ungefähres Maß für die Größe der Streuung in den zur Berechnung gelangenden Werten gelten. Aus beiden Werten wurde nochmals das arithmetische Mittel genommen. Das gibt wohl am genauesten die mittlere Helligkeitsbewertung des positiven Nachbildes an. In dieser Weise gefundene Mittelwerte sind in den Kurven (Fig. 6 und 7) durch ×-Punkte dargestellt; Tab. I S. 229 gibt diese Werte in Hakenklammern wieder. Die +-Punkte der Kurven bedeuten die ohne weiteres gefundenen arithmetischen Mittel der einem in der nämlichen Weise erzeugten positiven Nachbilde »gleich« hell geschätzten Helligkeiten (vgl. Fig. 5 und 7); Tab. I bringt diese Werte in runden Klammern. Die arithmetischen Mittel aus den beiden arithmetischen Mitteln der sämtlichen einem in der nämlichen Weise erzeugten positiven Nachbilde »eben merklich heller« und »eben merklich dunkler« beurteilten Helligkeiten sind zur Gewinnung der ×-Punkte mit in Rechnung gezogen und lassen sich ihrerseits aus den Werten der +-Punkte und der ×-Punkte berechnen, ihr Abstand von den +-Punkten soll als Relationsmaß der Streuung gelten. Weil aber an ihrer Statt der Abstand der +-Punkte von den ×-Punkten die gleiche Relation in einem auf $^1/_2$ verkürzten Maßstab wiedergibt, sind sie der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet.

Der Primärreiz sollte in möglichst weiten Grenzen variiert werden, damit die Versuche eine funktionelle Beziehung der Helligkeitsbewertung eines positiven Nachbildes zur Helligkeit des auslösenden Primärreizes möglichst deutlich erkennen ließen. Die obere Grenze der anwendbaren Reizstärken ist der stärkste Reiz, der noch keine Blendungserscheinungen auslöst, die untere Grenze ist der schwächste, dem noch eine Nachbilderscheinung folgt. Nach den bisher bekannten Tatsachen der experimentellen Psychologie pflegen für eine möglichst große Reizstärkenreihe gültige Gesetzmäßigkeiten an den Grenzen der Reihe modifiziert zu sein; Reizstärken nahe den Grenzen sind also zur Bestimmung dieser Gesetzmäßigkeiten ungeeignet. (Dagegen hat die Bestimmung der genannten Grenzen an sich Interesse, wenn erst die hier gesuchten Gesetzmäßigkeiten bekannt sind.)

Der hellste unter den benutzten Primärreizen, der eine Stärke von 244 MLm hatte, rief bei keinem anderen Beobachter als bei Dr. Malinowski eine Blendungsempfindung hervor; Dr. Malinowski

war infolge einer sieben Jahre vorher durchgemachten Chorioiditis gegen starke Lichteindrücke außerordentlich empfindsam, er ließ nur Reize zu, die höchstens 101 MLm stark waren.

Der schwächste Primärreiz, dessen positives Nachbild gut mit einem Sekundärreiz verglichen werden konnte, ist etwa 2,44 MLm stark, er wurde ebenso wie die stärkeren Primärreize 253 σ dargeboten. Sehr bald orientierten einige mit verschieden starken Primärreizen angestellten Versuchsreihen darüber, daß mit der Zunahme der Stärke des Primärreizes der Helligkeitswert des durch ihn ausgelösten positiven Nachbildes zunächst sehr schnell und später immer allmählicher sich ändert. Deswegen wurden die schwächeren Primärreize in engeren Grenzen variiert als die stärkeren, und es wurden 253 σ dauernde von der Stärke 2,44 MLm, 4,66 MLm, 6,05 MLm, 19,4 MLm, 37,8 MLm, 101 MLm und 244 MLm zu Primärreizen gewählt.

Die in den verschiedenen Versuchen gefundenen Helligkeitswerte der positiven Nachbilder, die durch verschiedene Reize ausgelöst wurden, beziehen sich stets auf den Zeitpunkt des hellsten Erscheinens eines positiven Nachbildes. Nach den Untersuchungen von v. Kries und von Martius war zu vermuten, daß dies hellste Erscheinen eines positiven Nachbildes um so eher nach der Reizdarbietung auftritt, je heller der Reiz war. v. Kries hat festgestellt, »daß die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des primären und dem Beginn des sekundären Bildes mit zunehmender Lichtstärke sich vermindert«[1]). Martius hat gezeigt, daß, »je höher die Intensität der Reize ...., um so kürzer die Empfindungsdauer oder um so kürzer das Weiterbestehen der Empfindung über die Reizdauer hinaus«[2]). Diese beiden Tatsachen führen auf Grund der wohlbegründeten Annahme, das Nachbilderscheinen sei ein oszillatorischer Vorgang[3]), zu der Vermutung, das Zeitintervall zwischen dem Beginn des vorhergehenden Lichteindruckes und dem Beginn und entsprechend auch dem hellsten Erscheinen positiver Nachbilder sei um so kürzer dauernd, je heller der

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. XII, S. 91.

[2]) G. Martius, Über die Dauer der Lichtempfindungen, Beitr. z. Psychol. und Philos., Bd. I, Heft 3, S. 348.

[3]) Vgl. Wundt, Physiol. Psychol.[6], Bd. II, S. 195 u. f.

Lichteindruck war. Indem die Zeit zwischen den Darbietungen von Primärreiz und Sekundärreiz stufenweise (aber während der einzelnen Versuchsreihen in verschiedener Reihenfolge) variiert wurde, ließ sich recht genau die Zeit ermitteln, die zwischen dem Erscheinen des Reizes und dem seines positiven Nachbildes vergeht. Denn ob das hellste Erscheinen des positiven Nachbildes und das Auftreten des Sekundärreizes gleichzeitig geschah, oder welches von beiden vorausging, ließ sich leicht und (nach der großen Konstanz der Ergebnisse einer Versuchsreihe zu schließen) sehr genau beurteilen. Die Ergebnisse einzelner Versuchsreihen bestätigten ausnahmlos die Vermutung: Es folgt das hellste Erscheinen eines positiven Nachbildes seinem Reiz um so eher, je heller er war. Aus den Ergebnissen einer großen Anzahl von Versuchsreihen, die an verschiedenen Tagen angestellt waren, ergab sich erstens aus jeder einzelnen Versuchsreihe eine Bestätigung dieses Satzes, ferner aus dem Vergleich verschiedener Versuchsreihen, in denen die absolute Größe der Helligkeitsbewertung schwankte, der Satz: Je heller ein positives Nachbild ist, um so eher folgt sein hellstes Erscheinen dem Reiz. Wenigstens für die positiven Nachbilder nach starken Reizen wurde deutlich nachgewiesen, daß ihr hellstes Erscheinen sich beträchtlich verspätete, wenn sie aus damals noch unbekanntem Grunde besonders lichtschwach erschienen. Mehr konnte wegen der Größe ihrer Ergebnisschwankungen durch die vorliegenden Versuchsreihen nicht festgestellt werden; so ist es noch nicht sicher, ob gleich helle positive Nachbilder stets zur nämlichen Zeit nach der Reizdarbietung am hellsten erscheinen, gleichgültig, von welchem Reize die Nachbilder ausgelöst waren, ob also zwischen dem Helligkeitsgrade eines positiven Nachbildes und dem Zeitpunkte seines hellsten Auftretens eine funktionelle Beziehung besteht, oder ob der auf die Nachbilderscheinung noch unbekannte Einfluß eine Änderung ihrer Helligkeit und ihres zeitlichen Verlaufes etwa nach besonderen Gesetzen bewirkt. Die Frage, warum das Helligkeitserscheinen in möglichst konstanter Weise ausgelöster positiver Nachbilder von Versuchsreihe zu Versuchsreihe, d. h. an Versuchsreihen verschiedener Tage, größere Schwankungen zeigt, als innerhalb einer Versuchsreihe, kann erst nach Besprechung sämtlicher Einflüsse auf die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder beantwortet werden. Der Zeitpunkt

des hellsten Erscheinens eines positiven Nachbildes wurde zunächst in der Absicht bestimmt, stets gleichzeitig mit ihm den Sekundärreiz geben zu können, damit für jedes positive Nachbild in gleichartiger Weise sein Helligkeitswert bestimmt werden kann. Während dieser Untersuchungen mit zu verschiedener Zeit nach dem Primärreiz auftretendem Sekundärreiz wurden zwischendurch auch die Helligkeitsvergleiche von positivem Nachbild und Sekundärreiz vorgenommen. Sie zeigen, daß unter sonst gleichen Versuchsbedingungen der Helligkeitswert dieser Nachbilder gleich bleibt, wenn der Sekundärreiz kurz vor, oder gleichzeitig mit, oder etwas nach dem positiven Nachbilde auftritt. Der Zeitpunkt des hellsten Erscheinens eines positiven Nachbildes lag unter den gegebenen Versuchsbedingungen etwa 1400 σ bis etwa 3000 σ nach dem Verschwinden seines Reizes. Für jeden einzelnen Primärreiz wurde nachgewiesen, daß sein positives Nachbild gleich hell bewertet wurde, gleichviel ob sein Sekundärreiz 1390 σ oder bis zu 8969 σ nach Verschwinden des Primärreizes auftrat. Ein Beobachter freilich meinte, das positive Nachbild verliere in dem Zeitpunkt, wo der Sekundärreiz auftritt, aber auch nur für dessen Dauer, an Helligkeit. Die Versuchsergebnisse auch dieses einen Beobachters sprechen indes gar nicht für diese Meinung, führten vielmehr stets zu dem soeben ausgesprochenen Satz. Die Helligkeiten von positivem Nachbild und Sekundärreiz waren aber am bequemsten zu vergleichen und zeigten die geringsten Schwankungen, wenn der Sekundärreiz kurz nach dem hellsten Erscheinen des positiven Nachbildes auftrat. Zur Helligkeitsbestimmung der durch die verschiedenen Reize ausgelösten positiven Nachbilder zeigte es sich günstig, daß der Sekundärreiz konstant 2078 σ, oder (in der anderen Hälfte sämtlicher Versuchsreihen) konstant 2897 σ nach Verschwinden des Primärreizes dargeboten wurde. Die gefundenen Werte bezogen sich dabei doch stets auf den Zeitpunkt des hellsten Erscheinens eines positiven Nachbildes. Eine eingehendere Bestimmung dieses Zeitpunktes wurde nicht vorgenommen; denn zur vorläufigen Orientierung genügen die oben gegebenen Daten, und weiter zu forschen verlohnt sich erst, wenn die Bedingungen der Schwankungen in den Ergebnissen von Versuchsreihe zu Versuchsreihe genau bekannt sind und beherrscht werden können. Mit der Methode, gleichzeitig zum hell-

sten Erscheinen des positiven Nachbildes einen Sekundärreiz zu geben, ließe sich das zeitliche Erscheinen eines positiven Nachbildes leichter und genauer bestimmen, als durch Reagieren auf das erste Auftreten und auf das Verschwinden eines positiven Nachbildes. Zur Bestimmung der letzten beiden Zeitpunkte wurden die Martiusschen Reaktionsversuche wiederholt, die Ergebnisse der im Reagieren ziemlich ungeübten Beobachter zeigten viel größere Schwankungen als die Martiusschen, sie dürfen aber doch als Bestätigung der Martiusschen Sätze gelten. Wie Martius selbst hervorhebt, ist es recht schwierig, auf erstes Auftreten und auf Verschwinden eines positiven Nachbildes zu reagieren[1]), die Erscheinung schleicht sich gleichsam vor das Auge und schwindet hernach dahin, nach dem Aubertschen Gleichnis, wie ein Wassertropfen auf der glühenden Herdplatte. Es ist noch schwieriger, auf das hellste Erscheinen des positiven Nachbildes zu reagieren; man erwartet nämlich, das Nachbild könne immer noch heller werden, bis man es schließlich als schon deutlich dunkler werdend erkennt. Dagegen läßt es sich leicht und genau beurteilen, ob nach der Darbietung des Sekundärreizes das positive Nachbild noch heller wurde oder nicht.

Bei Darbietung der verschiedenen Primärreize ging das Erleben der positiven Nachbilder in ziemlich gleichartiger Weise vor sich: Dem Beobachter erschien nach dem Verschwinden des Primärreizes an dessen Stelle für ganz kurze Zeit eine dunkle Phase, die ebenso dunkel wie das übrige Gesichtsfeld außer dem Fixierpunkt war; ob ein Lichthof sie umgab, konnte nicht bemerkt werden. Der ersten dunkeln Phase folgte für sehr kurze Zeit eine helle Phase, die plötzlich gleichsam aufblitzte und ebenso plötzlich verschwand, aber ganz deutlich als nach Form und Größe dem Primärreiz gleich aufgefaßt werden konnte, sie erschien wohl halb so hell als der Primärreiz selbst und stets farblos. Die nun folgende dunkle Phase erschien zwar nicht dunkler als der größte Teil des Gesichtsfeldes, war aber durch einen Lichthof umgeben, der an den Rändern des dem Primärreiz entsprechenden Rechteckes am hellsten war, hier fast zu hellen Linien führte und nach außen sich allmählich verlor. Der ganze

---

[1]) Beitr. z. Psychol. u. Philos., Bd. I, H. 3, S. 321.

Lichthof schwand langsam immer mehr, indem zunächst seine Helligkeit an den Innenrändern (der Umrandung des Rechtecks) abnahm, bis er sich schließlich gleichmäßig verlor. Das Rechteck, das er umschlossen hatte, tauchte dabei allmählich als ganz schwaches positives Nachbild hervor, dessen Helligkeit stieg weiter allmählich bis zu seinem höchsten Wert, den es ein Weilchen behielt, dann nahm seine Helligkeit ab, und noch allmählicher als es angestiegen war, verlor sich das Nachbild im Hintergrund. Die Aufmerksamkeit wurde außer auf die starre Fixation möglichst auf die Erfassung des hellsten Nachbilderscheinens und auf den Helligkeitseindruck des Sekundärreizes konzentriert. Beide Helligkeiten wurden miteinander verglichen, nach Schneider wurde die Nachbildhelligkeit an die Sekundärreizhelligkeit, nach Biener umgekehrt die Sekundärreizhelligkeit an die Nachbildhelligkeit angeglichen, und nach Dr. Tichý fand ein unmittelbarer Vergleichsakt statt, der nicht näher zu analysieren war. Beobachter Biener hielt die Art des Vergleichens für sehr wichtig, da immer jenes Gebilde, an das angeglichen wird, dem Mittelpunkte der Aufmerksamkeit näher stünde und infolgedessen als heller apperzipiert würde. Würden die Versuchsergebnisse entsprechend den Vermutungen Bieners merklich beeinflußt, so müßten gerade dessen Nachbildbestimmungen zu besonders hohen Werten geführt haben; wie die Kurven in Fig. 5 und die Werte der Tab. I zeigen, ist dies wirklich der Fall. Die Beobachtungen Bieners führten indessen nicht zu verschiedenen Ergebnissen, wenn er sich während einer Versuchsreihe bemühte, den Vergleichsakt einmal in der von ihm geschilderten, einmal in der umgekehrten Weise durchzuführen.

Die Erscheinungen folgten einander in der geschilderten Weise nach den Angaben der Beobachter Goldschmidt, Schneider und Dr. Tichý; freilich waren die Erscheinungen nicht stets gleich deutlich in allen Einzelheiten zu erkennen und traten sogar z. T. häufig gar nicht ein. Sehr selten fehlte nach einiger Übung im Fixieren das positive Nachbild und fast nur nach dem schwächsten, oder nach dem stärksten Primärreiz. Die kurz nach dem Primärreiz folgende blitzartige helle Phase trat hingegen nach den schwächsten Primärreizen niemals, am häufigsten nach den stärksten auf, aber auch nach diesen nur annähernd regelmäßig; bei einem Fehlen dieser Phase ließ sich eine vorausgehende dunkle nicht bemerken. Die ihr folgende

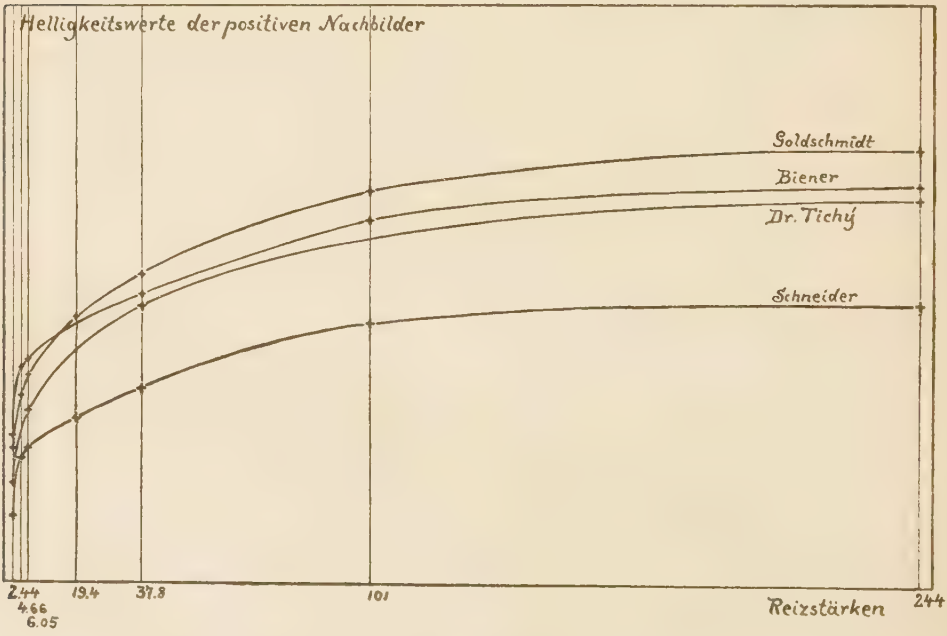
Tabelle I.

Beobachter	Gesamtzahl der Beobachtungen	Reizstärken: 2,44 MLm	4,66 MLm	6,05 MLm	19,4 MLm	37,8 MLm	101 MLm	244 MLm
		Helligkeitswerte der positiven Nachbilder. (Die Mittelwertergebnisse sind allein auf Grund der Gleichheitsurteile nach Ausschluß der Versuchsreihen berechnet, wo Sekundärreiz und positives Nachbild verschiedenfarbig erschienen, oder wo ein besonders starkes Eigenlicht bemerkt wurde; in runden Klammern sind noch die Mittelwerte beigefügt, die ohne Ausschluß dieser Versuchsreihen berechnet wurden, in Hakenklammern die arithmetischen Mittel aus den Mittelwertergebnissen sämtlicher »Gleich«-Urteile und den arithmetischen Mitteln aus den Mittelwertergebnissen der »Eben merklich größer«- und der »Eben merklich kleiner«-Urteile.)						
Biener	708	0,373 MLm (0,341 MLm) —	0,500 MLm (0,491 MLm) —	0,552 MLm (0,509 MLm) —	0,662 MLm (0,599 MLm) —	0,720 MLm (0,656 MLm) —	0,867 MLm (0,832 MLm) —	0,961 MLm (0,915 MLm) —
Goldschmidt	435	— (0,305 MLm —	— (0,439 MLm) —	— (0,477 MLm) —	— (0,608 MLm) —	— (0,701 MLm) —	— (0,898 MLm) —	— (0,984 MLm) —
Schneider	1147	0,229 MLm (0,142 MLm) [0,203 MLm]	0,367 MLm (0,286 MLm) [0,341 MLm]	0,381 MLm (0,309 MLm) [0,360 MLm]	0,465 MLm (0,377 MLm) [0,434 MLm]	0,537 MLm (0,441 MLm) [0,511 MLm]	0,680 MLm (0,595 MLm) [0,652 MLm]	0,718 MLm (0,638 MLm) [0,728 MLm]
Dr. Tichý	1443	0,281 MLm (0,223 MLm) [0,295 MLm]	— — —	0,453 MLm (0,397 MLm) [0,461 MLm]	— — —	0,671 MLm (0,628 MLm) [0,709 MLm]	— — —	0,948 MLm (0,874 MLm) [0,960 MLm]

Den rund eingeklammerten Werten entsprechen die +-Punkte, den Werten in Hakenklammern die ×-Punkte der Kurven (in Fig. 5—7).

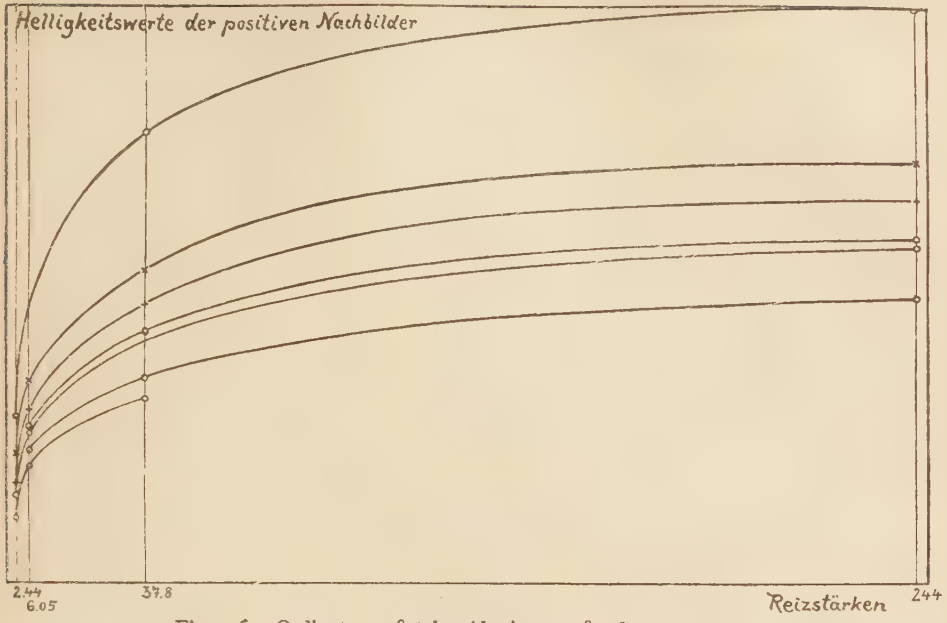
langdauernde dunkle Phase, oder vielmehr der sie umgebende Lichthof, drängte sich der Aufmerksamkeit nur wenig auf und wurde meist nicht beachtet, konnte indes bei darauf gerichteter Aufmerksamkeit fast ausnahmslos bemerkt werden; aber auch dann war der Lichthof nicht immer gleich hell und war auch nicht immer an allen vier Seiten (des Rechtecks [*A*, vgl. Fig. 3]) gleichmäßig ausgebildet. Von der gegebenen Schilderung weichen die Angaben des Beobachters Biener nur insofern ab, als das Ansteigen der Helligkeit des positiven Nachbildes ihm langsamer zu sein schien als deren Sinken, und als er einige Male dem positiven Nachbilde noch während der Dunkelzeit ein negatives Nachbild folgen sah.

Das zunächst wesentlichste Ergebnis der Hauptversuchsreihen: die Helligkeitswerte der durch die verschiedenen Primärreize ausgelösten positiven Nachbilder zeigen Tab. I und die Kurven in Fig. 5—7; in den Kurven sind die Primärreizstärken als Abszissen, die Helligkeitswerte der positiven Nachbilder in einem 122,4 mal größeren

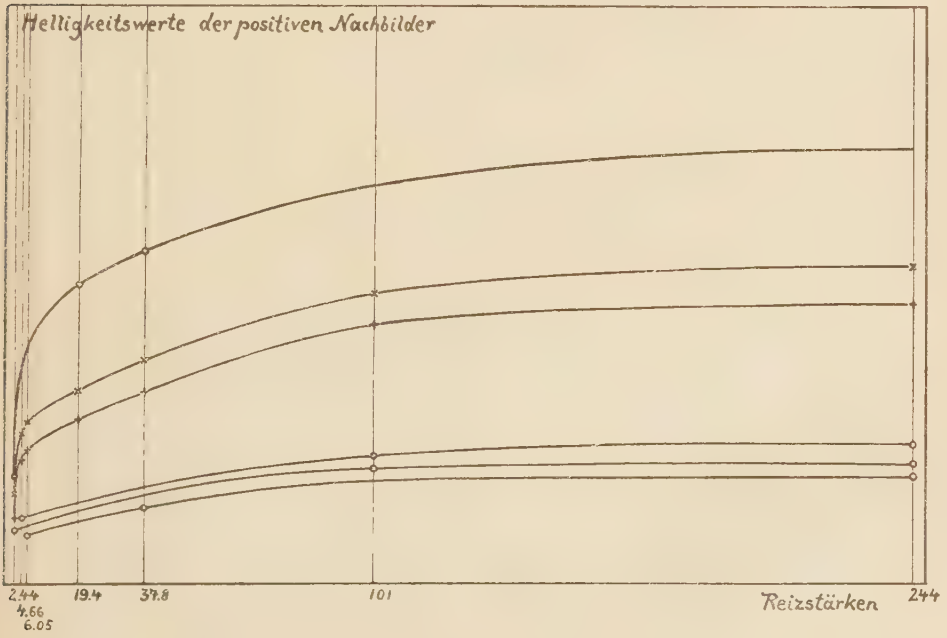


Figur 5.

Ordinatenmaßstab: Abszissenmaßstab = 122,4 : 1.



Figur 6. Ordinatenmaßstab: Abszissenmaßstab = 122,4 : 1.



Figur 7. Ordinatenmaßstab: Abszissenmaßstab = 122,4 : 1.

Maßstabe als Ordinaten eingetragen; durch einen Kurvenpunkt ist also in der Ordinate der Wert für das hellste Erscheinen eines positiven Nachbildes und in der Abszisse die Stärke von dessen Reiz bestimmt.

Die in Tab. I wiedergegebenen Werte zeigen deutlich: Je stärker ein Reiz ist, um so größer ist der Helligkeitswert des durch ihn ausgelösten positiven Nachbildes; in zwei korrespondierenden Reihen von Reizstärken und Nachbildhelligkeiten wachsen aber die Reizstärken durchgängig erheblich schneller als die Helligkeitswerte der positiven Nachbilder, im Bereich der schwachen Reize ist die Progression in den Helligkeitswerten der positiven Nachbilder verhältnismäßig noch am größten und nimmt mit zunehmender Reizstärke allmählich immer mehr ab. Entsprechend zeigen die Kurven der Helligkeitswerte positiver Nachbilder bei wachsender Reizstärke einen annähernd hyperbolischen Verlauf (vgl. Fig. 5).

Für die Beurteilung der in den Tabellen wiedergegebenen Mittelwerte aus der Gesamtheit aller Versuchsergebnisse ist es wichtig zu wissen, mit welcher Genauigkeit jeder Einzelwert bestimmt wurde, und wieweit die Ergebnisse aller Einzelbeobachtungen untereinander übereinstimmen. Es ist also für die Beobachtung des Helligkeitswertes positiver Nachbilder erstens die Unterschiedsschwelle und zweitens ein Streuungsmaß anzugeben. Daß man nicht etwa berechtigt ist, die zwei Daten einander gleich oder ihre Wertreihen einander proportional zu setzen, zeigte G. E. Müller schon in seinen kritischen Beiträgen zur Grundlegung der Psychophysik[1]).

Die Unterschiedsschwelle für die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder mußte unter den gleichen Versuchsbedingungen gewonnen werden, unter denen die Einzelbeobachtungen gemacht wurden, deren Ergebnisse zu den Werten der Tab. I führten. Wie schon oben[2]) erwähnt wurde, konnte etwa nach dem von Klemm angewandten Verfahren aus solchen Versuchsreihen die Unterschiedsschwelle berechnet werden, wo für ein in bestimmter Weise ausgelöstes positives

[1]) G. E. Müller, Kritische Beiträge zur Grundlegung der Psychophysik², §§ 26 und 27.

[2]) S. 222.

Nachbild eine genügende Zahl von Indifferenzurteilen vorkam, sofern dabei die Sekundärreize in der nämlichen Progression variiert worden sind. Aus der folgenden Versuchsreihe z. B. wurde das durch einen Reiz von 244 MLm ausgelöste positive Nachbild in 17 einander folgenden Versuchen $<$[1]) 0,956 MLm; $>$ 0,552 MLm; $<$ 0,676 MLm; $=$ 0,591 MLm; $>$ 0,552 MLm; $>$ 0,676 MLm; $<$ 0,781 MLm; $=$ 0,835 MLm; $=$ 0,632 MLm; $<$ 0,835 MLm; $=$ 0,729 MLm; $=$ 0,591 MLm; $>$ 0,632 MLm; $<$ 0,894 MLm; $=$ 0,729 MLm; $<$ 0,894 MLm; $<$ 0,781 MLm starke Sekundärreize bewertet; daraus berechnet sich der relative Unterschiedsschwellenwert zu 0,14. Durch diese und ähnliche Versuchsreihen desselben Beobachters Dr. Tichý wurden für verschieden helle positive Nachbilder die in Tab. II wiedergegebenen relativen Unterschiedsschwellen bestimmt.

Tabelle II.

	Reizstärken: 6,05 MLm			244 MLm			
Äquivalenzwerte der positiven Nachbilder, die durch dieseReize ausgelöst wurden	0,277 MLm	0,281 MLm	0,303 MLm	0,598 MLm	0,632 MLm	0,635 MLm	0,685 MLm
Approximative Werte der relativen Unterschiedsschwellen für die Helligkeitsbewertung der nämlichen positiven Nachbilder	0,12	0,26	0,14	0,31	0,13	0,37	0,26

Zur Charakterisierung der Berechnungsweise sei beiläufig bemerkt, daß die nach Klemm auf Grund der Indifferenzurteile berechneten Äquivalenzwerte und die auf Grund der Gleichheitsurteile berechneten arithmetischen Mittel in den der Tab. II zugrunde liegenden Versuchsreihen um 5,1 % bis 11,7 % des größeren Wertes auseinanderstehen.

Zur Feststellung, ob dem Weberschen Gesetz entsprechend die relative Unterschiedsschwelle für die Helligkeitsbewertung verschiedener positiver Nachbilder konstant bleibt, können die in Tab. II wieder-

[1]) Über die Bedeutung der Zeichen vgl. o. Anm. 3 auf S. 221.

gegebenen Werte nicht genügen; die Daten sprechen aber wenigstens nicht gegen eine solche Annahme. Aus den Mittelwerten der wiedergegebenen, wie auch der anderen vorliegenden Daten, ließe sich höchstens schließen, daß die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder, die durch die stärksten vorkommenden Reize (von 244 MLm) ausgelöst werden, ein wenig gröber ist als bei den übrigen. Unter Benutzung aller vorliegenden Versuchsergebnisse ließe sich der Satz durch eine hierzu geeignete Zahl von Einzelbeobachtungen nachprüfen; dabei wäre zu berücksichtigen, daß durch die Folge vom Lichteindruck des Reizes und dem je nach dessen Stärke sich in wechselndem Verhältnis zur ersten Helligkeit ändernden positiven Nachbilde für eine Untersuchung über das Webersche Gesetz ganz besonders komplizierte Bedingungen gegeben sind. — Bei Lösung der hier gestellten Aufgabe wäre es interessant, der folgenden von Helmholtz[1]) beschriebenen Tatsache nachzugehen: Es sind »im positiven Nachbilde oft auch Grade der Helligkeit bemerkbar, welche beim direkten Anblick [sc. des Reizes] (wegen zu großer Helligkeit) nicht unterschieden werden«. Eine analoge Beobachtung machte Hering[2]) bei Untersuchung negativer Nachbilder, die dem Eindruck eines gleichmäßig weißen Streifens folgte, der quer über die Trennungslinie eines hellen und dunklen Hintergrundes gelegt war, und der in der Geraden der Trennungslinie $^1/_2$ bis 1 Minute fixiert wurde; es zeigte sich dann, daß die Helligkeitsdifferenz zweier Streifen (durch Simultankontrast) »im Nachbilde im allgemeinen viel größer« erscheint als »im Vorbilde«. Die Helmholtzsche Beobachtung wurde in sehr einfacher Weise experimentell bestätigt, indem der Primärreiz mit einem oder mehreren Blättern farbloser Gelatine teilweise verdeckt wurde; der Primärreiz erschien dabei stets homogen, und erst im positiven Nachbilde waren Helligkeitsunterschiede wahrnehmbar, aber selbst dann, wenn sie auch hier nicht zur Auffassung gelangen konnten (wenn die Teilreizstärken 37,8 MLm und 36,3 MLm bis 33,3 MLm betrugen), machten sie sich hier geltend, indem die zuvor nicht wahrgenommene Grenze der beiden Reizteile im positiven Nachbilde als dunkle Linie erschien. (Diese Tatsache deutet

[1]) Helmholtz, Handb. d. Physiol. Opt.[2], S. 503.

[2]) Sitzungsberichte d. k. k. Akademie d. Wissensch. zu Wien, Bd. LXVIII, III. Abt., 11. XII. 1873.

wie manche andere, deren Beschreibung in den nächsten Schilderungen von Untersuchungen positiver Nachbilder folgen soll, auf eine Korrespondenz der Erscheinungen der sukzessiven Induktion und des Simultankontrastes.)

Die Werte der Tab. II wurden, wie erwähnt, an dem Beobachter Dr. Tichý unter Versuchsbedingungen gewonnen, unter denen positive Nachbilder mit Sekundärreizhelligkeiten verglichen zu werden pflegten. Die Werte stammen sämtlich aus Versuchsreihen, bei denen keine Blickschwankung, keine Aufmerksamkeitsschwankung und keine Erschwerung des Helligkeitsvergleichens durch Verschiedenfarbigkeit von Nachbild und Sekundärreiz vorkam, zeigen also wohl die möglichst feinen Schwellen; Versuchsreihen, bei denen infolge Ermüdung des Beobachters oder aus anderen Gründen selbst nur ein einziger Fehlversuch vorkam, oder bei denen Nachbild und Sekundärreiz verschiedenfarbig erschienen, zeigten stets gröbere, oft ganz beträchtlich gröbere Schwellenwerte (bis zu 0,8). Die Tage, an denen die Werte gewonnen wurden, liegen z. T. um Monate auseinander; die erste Versuchsreihe wurde durchgeführt, nachdem der Beobachter offenbar schon die bestmögliche Übung erreicht hatte, denn in chronologischer Ordnung lassen die Werte keinen Einfluß weiterer Übung erkennen. Auch sonst machten sich außer den vorerwähnten Bedingungen und der allgemeinen Frische des Beobachters keinerlei Einflüsse auf die Schwellenwerte geltend, die auch noch zu deren Schwanken geführt haben könnten. Das Gleiche gilt für die von den Beobachtern Goldschmidt und Schneider gefundenen Schwellenwerte; sie zeigen nichts Bemerkenswertes, sind nur durchweg ein wenig gröber als die Werte der Tab. II.

Daß die Schwellenwerte durchgängig etwas grob[1]) sein würden, war von vornherein zu erwarten. Die zu vergleichenden Felder haben ja für ein Photometrieren nicht einmal die günstigste Form und nicht die günstigste Lage zueinander[2]). Es wurde aber noch festgestellt,

[1]) Unter den für einen Helligkeitsvergleich günstigsten Bedingungen, daß zwei Reizfelder sich unmittelbar berühren, daß also weder durch ihr Auseinanderstehen noch durch eine Trennungslinie ihr Helligkeitsvergleichen erschwert wird (z. B. bei rotierenden Scheiben oder bei Anwendung der Schattenmethode), wurden für die Unterschiedsschwelle Werte von $^1/_{100}$ bis $^1/_{180}$ gefunden; vgl. Nagel, Handbuch der Physiol. d. Mensch., Bd. III (1905), S. 205.

[2]) Vgl. o. S. 176.

daß die Unterschiedsschwelle beim Helligkeitsvergleichen eines positiven Nachbildes mit einem Sekundärreiz erheblich gröber ist als die Schwelle beim Vergleichen zweier in entsprechender Weise objektiv dargebotener Helligkeiten. Dieser Satz ergab sich, als unter Konstanz der übrigen Versuchsbedingungen ein Primärreiz von 253 σ Dauer und 0,81 MLm Stärke gleichzeitig mit einem 310 σ dauernden, in seiner Stärke variablen Sekundärreiz dargeboten wurde; dann hatten die Beobachter Goldschmidt, Schneider und Dr. Tichý eine durchschnittlich vier- und dreimal feinere und ganz durchgängig eine beträchtlich feinere Unterschiedsschwelle als beim Vergleich vom positiven Nachbild mit der Sekundärreizhelligkeit. Auch dies ist leicht erklärlich, da wahrscheinlich durch das allmähliche Ansteigen und Abklingen der Nachbildhelligkeit deren Helligkeitsbewertung erschwert wird; möglicherweise wird die Genauigkeit des Helligkeitsvergleichens noch durch das Auftreten des dem Nachbilde vorausgehenden Primärreizes beeinträchtigt.

Die Breite der Streuung in den Ergebnissen einer einzelnen Versuchsreihe, d. h. die Differenz der am weitesten auseinander stehenden Werte für die einem in bestimmter Weise ausgelösten positiven Nachbilde gleich bewerteten Helligkeiten, ist ähnlich wie die Unterschiedsschwelle im Verhältnis zur absoluten Helligkeit des betreffenden Nachbildes annähernd konstant, mit Ausnahme der Versuchsreihen, wo Nachbild und Sekundärreiz verschiedenfarbig erschienen, oder wo besonders starkes Eigenlicht bemerkt wurde. Außer diesen beiden Einflüssen bedingten ein Schwanken der Streuungsbreite nur die Umstände, die auch zu einem Schwanken der Unterschiedsempfindlichkeit bei der Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder führten. Die individuellen Unterschiede in den Streuungsbreiten korrespondieren recht gut mit denen der Unterschiedsempfindlichkeit. Aus den Versuchsreihen des Beobachters Dr. Tichý, der die feinste Unterschiedsempfindlichkeit hatte, wurde als durchschnittliche Streuungsbreite $\pm$ 16 % (des arithmetischen Mittels sämtlicher dem Nachbilde während einer Versuchsreihe gleichgeschätzten Helligkeitswerte) berechnet. Die durchschnittliche Streuungsbreite der Beobachter Biener, Goldschmidt und Schneider betrug $\pm$ 33,2 %, $\pm$ 18,1 % und $\pm$ 26,1 %.

Die in verschiedenen Versuchsreihen gefundenen zueinander ge-

hörigen Mittelwerte differieren voneinander gewöhnlich etwas mehr, manchmal erheblich weniger, bisweilen verhalten sie sich indessen wie 1 : 3 oder 1 : 4. Die Ergebnisse, die so sehr stark von den aus sämtlichen Versuchsreihen berechneten Mittelwerten abweichen, zeigen ausnahmslos besonders geringe Nachbildhelligkeiten.

Für eine allgemeine Bedeutung der gefundenen Versuchsergebnisse ist vor allem die folgende Tatsache von grundlegender Wichtigkeit: »Die Relationen der Helligkeitswerte von positiven Nachbildern, die durch verschieden starke Reize ausgelöst wurden, sind ungemein konstant«. Zur Illustration des Satzes von der Konstanz der relativen Nachbildhelligkeit wurden die aus 36 Versuchsreihen des Beobachters Dr. Tichý gefundenen Relationen der beiden Helligkeitswerte positiver Nachbilder, die von zwei verschieden starken Lichtreizen ausgelöst waren, so zusammengestellt, daß die sämtlichen Helligkeitswerte der schwächeren von zwei miteinander verglichenen Nachbildern = 1 gesetzt wurden, daß die Zahlen also angeben, wievielmal das positive Nachbild, das durch den stärkeren der beiden Reize einer Gruppe ausgelöst wurde, heller ist als das andere durch den schwächeren ausgelöste. (Vgl. Tab. III.) Die Tabelle zeigt nun freilich von allen gefundenen Werten die am besten übereinstimmenden. Während die hier wiedergegebenen Relationswerte gegenüber den aus sämtlichen Versuchsreihen berechneten mittleren Relationswerten um etwa $\pm$ 4 % schwanken, kommen in einzelnen Fällen, besonders auch bei anderen Beobachtern, erheblich stärkere Schwankungen vor. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei dem weiten Bereich der einem bestimmten Nachbild gleichgeschätzten Helligkeiten die abgegebenen Gleichheitsurteile bei einer zu geringen Zahl von Beobachtungen leicht zu einem Mittelwert führen können, der von der wirklichen Mitte des Bereiches der dem Nachbild gleichgeschätzten Helligkeiten stark abweicht. Und es stimmen tatsächlich die verschiedenen Relationswerte untereinander am genauesten bei dem Beobachter, bei dem dies Schwankungsbereich am geringsten war, eben bei Dr. Tichý. Da die Relationswerte, die untereinander stärker differieren als die Zahlen der Tab. III, alle ziemlich gleichmäßig über und unter dem mittleren Relationswerte liegen, da ferner die stärkeren und stärksten Abweichungen nur sehr selten vorkommen, läßt sich aus stärkeren Abweichungen nur auf eine geringere Ge-

nauigkeit der Beobachtungen schließen; und es erübrigt sich die Wiedergabe sämtlicher Relationswerte um so mehr, als die in Tab. III mitgeteilten Werte den Satz von der Konstanz der relativen Nachbildhelligkeit genügend beweisen. Zudem zeigen die *o*-Kurven der Fig. 6 und 7, daß die aus einzelnen Versuchsreihen der Beobachter Schneider und Dr. Tichý auf Grund der Gleichheitsurteile gewonnenen Mittelwertkurven der Helligkeiten positiver Nachbilder sehr gut proportionale Abbildungen der in gleicher Weise aus sämtlichen Versuchsreihen gefundenen (als Verbindung der +-Punkte eingezeichneten) Mittelwertkurven sind, wie dies nach dem Satz von der Konstanz der relativen Nachbildhelligkeit zu erwarten ist.

Tabelle III.

Primärreize, die abwechselnd während einer Versuchsstunde dargeboten wurden,	und die in verschiedenen Versuchsstunden positive Nachbilder auslösten, deren Helligkeitswerte die folgenden auf den Nenner 1 gebrachten Relationen hatten:					
6,05 und 2,44	1,712	1,741	1,748	1,764	1,815	1,843
37,8 „ 2,44	2,709	2,731	2,789	2,831	2,898	2,927
244 „ 2,44	3,786	3,808	3,847	3,879	3,921	3,983
37,8 „ 6,05	1,505	1,531	1,572	1,593	1,638	1,642
244 „ 6,05	2,134	2,176	2,211	2,244	2,253	2,265
244 „ 37,8	1,341	1,367	1,372	1,398	1,406	1,432

Beiläufig ergibt sich aus der weitgehenden Übereinstimmung der in verschiedenen Versuchsstunden gefundenen Ergebnisse (vgl. Tab. III sowie Fig. 6 und 7), daß die Versuchsanordnung noch genauere Bestimmungen zuließ, als nach der Kritik der Versuchsweise angenommen werden durfte.

Warum die Schwankungen von Versuchsreihe zu Versuchsreihe größer sind als innerhalb einer Versuchsreihe, läßt sich zunächst nicht erklären. Aus der Kritik der Versuchsanordnung ergibt sich mit Sicherheit, daß nicht etwa durch deren Mängel, sondern durch eine Änderung in der Disposition des Beobachters diese Schwankungen verursacht sind. Für die augenscheinliche Abhängigkeit der Dispositionsänderung von der Tageshelligkeit spricht auch: An einem bestimmten Tage zeigten in zwei einander folgenden Versuchsstunden Versuchsreihen verschiedener Beobachter

fast ausnahmslos in den Helligkeitsbewertungen positiver Nachbilder Abweichungen gleicher Richtung von den aus sämtlichen Versuchsreihen berechneten Mittelwerten. Danach kann irgendeine durch die Tageshelligkeit bewirkte Änderung des allgemeinen Adaptationszustandes vermutet werden. Die Vorversuche hatten nur gezeigt, daß während ein und derselben Versuchsreihe die Disposition des Beobachters als konstant angesprochen werden durfte[1]), und diese Erfahrung hatten alle weiteren Versuchsreihen bestätigt.

Es war erwiesen worden, daß bei jeder Einzelbeobachtung einer Versuchsreihe der Beobachter die nämliche Hell-Dunkel-Adaptation hatte[2]); nach den Daten der zu diesem Nachweise führenden Versuchsreihen darf die Hell-Dunkel-Adaptation für alle Einzelbeobachtungen auch verschiedener Versuchsreihen als konstant angenommen werden, zumal da auf den Verlauf des Nachbilderscheinens recht erhebliche Unterschiede im Adaptationszustande (nach einstündiger gegenüber 2,6 Sek. langer Dunkeladaptation) keinen Einfluß zeigten. Zu Beginn einer jeden Versuchsreihe ist die Hell-Dunkel-Adaptation als auf der ganzen Netzhaut in gleicher Weise bestimmt anzusehen; danach ist an der Stelle der Reizeinwirkung die lokale Hell-Dunkel-Adaptation entsprechend der gesamten zu Beginn aller Versuchsreihen gleich; für den Verlauf der einzelnen Versuchsreihe wurde die lokale Adaptation überhaupt, mithin auch die lokale Hell-Dunkel-Adaptation als konstant erwiesen; folglich hat die lokale Hell-Dunkel-Adaptation als in sämtlichen Einzelbeobachtungen konstant zu gelten, und die Schwankungen in den Helligkeitsbewertungen von in möglichst konstanter Weise erzeugten positiven Nachbildern, die sich in verschiedenen Versuchsreihen zeigen, lassen sich nicht aus Änderungen der Hell-Dunkel-Adaptation erklären.

Das Eigenlicht wurde an sehr hellen Tagen, wie oben[3]) erwähnt ist, vom Beobachter als besonders stark geschildert, überhaupt fast ausnahmslos an den Tagen, wo die positiven Nachbilder besonders dunkel erschienen. Da das Eigenlicht ähnlich wie ein positives Nach-

[1]) Vgl. o. S. 202—218.
[2]) Vgl. o. S. 202—209.
[3]) Vgl. o. S. 204—206 und S. 212.

bild in einem gewissen Abstande vor dem Auge lokalisiert wird und so für positive Nachbilder gleichsam die reagierende Lichtfläche abgibt, ist sein Einfluß auf den Helligkeitswert positiver Nachbilder wahrscheinlich. Durch das Wachsen der Eigenlichtstärke läßt sich zunächst aber nur ein Sinken der Helligkeit positiver Nachbilder und ohne weiteres nicht das verspätete Auftreten des hellsten Erscheinens der positiven Nachbilder erklären.

Die chromatische Adaptation oder die Bedingungen, die einen Farbenunterschied von positivem Nachbild und Sekundärreiz bemerkbar werden ließen, waren nach den Vorversuchen[1]) besonders an sehr hellen Tagen anders als gewöhnlich; die Helligkeitsbewertung der positiven Nachbilder zeigte sich an solchen besonders hellen Tagen niedriger als gewöhnlich. Eine Verschiedenfarbigkeit von positivem Nachbild und Sekundärreiz drängte sich den Beobachtern so störend auf, und die Änderung der Beobachtungsergebnisse ging damit so regelmäßig einher, daß die meisten Beobachter an einen Einfluß der chromatischen Adaptation auf den Verlauf der positiven Nachbilder dachten. Aber warum die Verschiedenfarbigkeit von positivem Nachbild und Sekundärreiz stets und bei allen Beobachtern den Einfluß zeigte, daß die Helligkeitswerte der positiven Nachbilder sanken, läßt sich so schwerlich erklären. Diese Erklärung wird vollends unmöglich durch weitere Tatsachen: Von den Beobachtern Goldschmidt und Dr. Tichý wurde auf Eintreten und Aufhören positiver Nachbilder reagiert, die durch gleich hell erscheinende weiße, rote, blaue und grüne Primärreize ausgelöst waren; bei sämtlichen Farben war der Schwankungsbereich in den (mittels Schreibmagneten auf einer berußten, rotierenden Heringschen Schleife registrierten) Reaktionszeiten nicht größer als bei der nämlichen Farbe. Und ein selektiv rotgrünblinder Beobachter reagierte auf Eintreten und Aufhören eines ihm farblos erscheinenden grünen Primärreizes so, daß seine Reaktionszeiten in das Schwankungsbereich der bei den Beobachtern Goldschmidt und Dr. Tichý gewonnenen fallen. Nach dem Satze, daß ein positives Nachbild in um so kürzerer Zeit seinem Reize folgt, je heller er ist, ließ sich aus der annähernden Gleichheit dieser Zeiten schließen: Der Helligkeitswert eines posi-

[1]) Vgl. o. S. 209 u. f., besonders S. 210/211.

tiven Nachbildes ist vom Farbenton seines Reizes annähernd unabhängig. An die zu diesem Satze führenden Versuchsreihen wurden andere zur Bestimmung des Helligkeitswertes positiver Nachbilder nach farbigen Primärreizen angeschlossen. Die schon zuvor benutzte Serie gleich hell erscheinender weißer und farbiger Reize diente zur Auslösung positiver Nachbilder, die in der üblichen Weise mit einem unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen farblos erscheinenden Sekundärreize verglichen wurden. Nach farbigen Reizen trat das positive Nachbild in der gleichen, freilich abgeblaßten Farbe auf, daneben sah der Sekundärreiz andersfarbig, meist gegenfarbig, aus. Der geforderte Helligkeitsvergleich war unter diesen Umständen außerordentlich schwierig und daher ziemlich unsicher. Die Ergebnisse widersprachen indes nicht dem Satze, daß der Helligkeitswert eines positiven Nachbildes vom Farbenton seines Reizes annähernd unabhängig ist. Wenn aber Verschiedenfarbigkeit von Sekundärreiz und positivem Nachbild dessen Helligkeitswert in bestimmter Richtung wesentlich beeinflussen würde, so hätten die Ergebnisse der zuletzt geschilderten Versuche dies wegen der meist noch größeren Verschiedenfarbigkeit in mindestens so deutlichen Schwankungen zeigen müssen als die Helligkeitswerte der Hauptversuchsreihen.

Ganz abgesehen davon, daß eine Änderung der chromatischen Adaptation zu verschiedenfarbigem Erscheinen von positivem Nachbild und Sekundärreiz führt und hierdurch den Helligkeitsvergleich beider beeinflußt, könnte eine Änderung der chromatischen Adaptation den Erscheinungsverlauf der positiven Nachbilder auch hinsichtlich seiner Helligkeit beeinflussen. Die Berechtigung zu dieser Annahme kann aber zunächst in keiner Weise wahrscheinlich gemacht werden; vielmehr spricht die in obigem Satze auch für die positiven Nachbilder bestätigte relative Selbständigkeit von Farbenton und Helligkeit entschieden dagegen.

Der Vergleich einzelner Versuchsreihen lehrte, daß mit den Tagen wechselnde Einflüsse in gleicher Art auf die verschiedenen Beobachter gewirkt und die Versuchsergebnisse beeinflußt haben. Danach könnte man wohl am ehesten erwarten, daß dies Einflüsse waren, welche auf die Hell-Dunkel- oder auch auf die chromatische Adaptation gewirkt haben, dann aber hätten sich ihre Wirkungen bei Betrachtung

der möglichen Beziehungen zwischen Adaptation und Nachbilderscheinen zeigen müssen. Daß die eben gegebene Aufzählung der dispositionellen Bedingungen für den Empfindungsverlauf nicht vollständig ist, folgt schon aus der Besprechung der Untersuchungen über den Adaptationsverlauf während einer einzelnen Versuchsstunde[1]), insbesondere wurde oben noch auf die Möglichkeit hingewiesen, daß die Stärke des Eigenlichtes je nach der Tageshelligkeit schwankt. Außerdem könnten möglicherweise die zu einem Nachbilderscheinen führenden Empfindungen vom Adaptationszustand unabhängigen besonderen Bedingungen folgen; es wäre gleichsam eine Nachbilderadaptation der Netzhaut anzunehmen.

Die Schwankungen in den Versuchsreihen verschiedener Tage sind aber vielleicht gar nicht durch Änderungen im Empfindungsverlauf bedingt, sondern durch Änderungen in Bedingungen für die Apperzeption der positiven Nachbilder und der Sekundärreize. Daß diese apperzeptiven Bedingungen als im Verlauf einer Versuchsstunde gleichbleibend anzusehen sind, wurde oben[2]) gezeigt. Ihre aber von Tag zu Tag möglicher Weise vorkommenden Modifikationen lassen sich als Ermüdung höheren und geringeren Grades charakterisieren. Daß eine bestimmte Witterung verschiedene Beobachter in annähernd der nämlichen Weise beeinflußt, die Ermüdung in gleicher Richtung sich ändern läßt, darf wohl vermutet werden.

Helmholtz bemerkt in seinem Handbuch der physiologischen Optik[3]) ganz allgemein, daß Nachbilder stärker erscheinen als sonst, wenn vor Beginn der Versuche die Augen angestrengt wurden, insbesondere wenn schon Nachbildbeobachtungen vorausgingen, und daß ganz entsprechend bei Augenkrankheiten, sowie bei alten Männern die Nachbilderscheinungen besonders stark zu sein pflegen. Ähnliche Bemerkungen finden sich häufig, auch schon bei Goethe. Genau untersucht hat diese Verhältnisse nur C. F. Müller[4]) und nur für

---

[1]) Vgl. o. S. 202 u. f.

[2]) Vgl. o. S. 213—218.

[3]) Helmholtz, Handb. d. Physiol. Opt.[2], § 23.

[4]) Carl Friedrich Müller Dissertation Universität Zürich, 1866, Versuche über den Verlauf der Netzhaut, S. 30. Er fand: »Beim Morgenversuch mit unermüdetem Auge erhalten wir . . . 60% Helligkeitsverluste, um 9 Uhr 30 Minuten beträgt dieser Verlust bei gleicher Ermüdungsdauer bloß 41%, und so sinken die Verlustprozente immer mehr und mehr, bis beim Abendversuch bloß 21—19% Helligkeits-

den Einfluß der Augenermüdung im Verlauf eines Versuchstages auf die Helligkeitsbewertung negativer Nachbilder. Welchen Einfluß eine derartige Ermüdung der Augen für die vorliegenden Versuchsreihen hat, muß nachgeprüft werden, ehe die Hauptaufgabe: aus den Versuchsergebnissen auf den Empfindungsverlauf zu schließen, weiter verfolgt werden darf.

Schon die Vorversuche hatten ergeben, daß sich bei Nachbildversuchen eine Ermüdungswirkung in den Helligkeitswerten einer Versuchsreihe nicht zeigt, selbst wenn diese Versuchsreihe über Stunden ausgedehnt wurde[1]). Auch unter noch extremeren Bedingungen zeigte sich kein Einfluß einer Ermüdung. Wurden nämlich am gleichen Tage zwei Versuchsreihen angestellt, die erste etwa eine Stunde, nachdem der Beobachter gut ausgeschlafen hatte, die zweite, nachdem der Beobachter seine Augen inzwischen möglichst viel bei starker oder schwacher Beleuchtung gebraucht hatte, so zeigten nach den Beobachtungen von Goldschmidt, Schneider und Dr. Tichý die Helligkeitsbewertungen positiver Nachbilder übereinstimmende Mittelwerte; nur die Streuung der Werte war in der zweiten Versuchsreihe größer. Zu dem nämlichen Ergebnis führte beiläufig auch eine Versuchsreihe des Beobachters Schneider, die gewonnen wurde, nachdem er eine halbe Stunde zuvor versehentlich in eine Quecksilberlampe geblickt hatte, so daß er bis kurz vor Beginn der Versuche an Blendungserscheinungen litt. Das Angestrengtsein der Augen ist mit Hering[2]) wohl so zu verstehen, daß nicht in den Augen selbst sich irgend etwas geändert hat, sondern daß die Sphäre der Ganglien des n. opticus im Occipitallappen ermüdet, unterernährt ist; so erklärt es sich, daß die Augenanstrengung offenbar nur auf die Genauigkeit der Auffassung von positiven Nachbildern, nicht aber

verlust sich ergeben. Dieses Sinken der Ermüdungswerte rührt nun offenbar daher, daß die Retina im Laufe des Tages durch den gewöhnlichen Gebrauch des Auges ermüdet und daher bei den Versuchen um 12, um 2, um 4 Uhr usw. schon zu Anfang des Versuches eine gewisse Quantität an Erregungsstärke eingebüßt hat und deshalb nicht in dem Verhältnis an Reizstärke verlieren kann, wie die unermüdete Retina am Morgen.«

[1]) Vgl. oben S. 208.

[2]) Handbuch der Augenheilkunde 1, XII, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn, 1 (1905), S. 69. Ein anschaulicher Versuch zur Erläuterung der Heringschen Anschauung wäre es, in einem Buche zu lesen, indem man es abwechselnd richtig und auf den Kopf gestellt vor sich hält.

auf den Empfindungsverlauf selbst von Einfluß ist. Danach wird sich eine allgemeine Ermüdung des Beobachters bei den Helligkeitsbewertungen positiver Nachbilder in ganz ähnlicher Weise zeigen. Und wirklich lehrten zwei und drei Versuchsreihen der Beobachter Biener und Dr. Tichý, die sie durchführten, trotzdem sie Fieber hatten, daß auch durch starkes Unwohlsein die Helligkeitswerte positiver Nachbilder nicht beeinflußt wurden; freilich waren die Angaben dann erheblich ungenauer als sonst, und es kam häufig dazu, daß überhaupt kein positives Nachbild gesehen, oder daß die starre Fixation nicht festgehalten wurde, und daß deshalb ein Versuch zu keinem brauchbaren Ergebnis führte. Nebenher mag erwähnt werden, daß die Beobachter selbst ihre Nachbilderscheinungen für besonders lebhaft und hell zu halten pflegten, wenn sie speziell optisch oder allgemein ermüdet waren; sie waren dann auch häufig den stärksten Reizen gegenüber empfindsam. (Analoge Tatsachen sind verschiedentlich beobachtet worden, z. B. daß nach Alkoholeinwirkung die Beobachter auf einen gegebenen Reiz schneller reagieren zu können glauben, während sie in Wirklichkeit beträchtlich langsamer reagieren.)

Der Einfluß einer Ermüdung des Auges auf den Verlauf der Nachbilderscheinung wurde häufig mit der Tatsache in Zusammenhang gebracht, daß bei verschiedenen Augenleiden die Patienten sehr häufig über starke und lästige Nachbilderscheinungen zu klagen pflegen. Wie weit dies auch für positive Nachbilder gilt, insbesondere, ob sie nicht nur häufiger zur Auffassung gelangen, sondern wirklich auch heller erscheinen als dem gesunden Auge, wurde bisher ebensowenig untersucht als der Helligkeitswert positiver Nachbilder überhaupt. Es bot sich Gelegenheit für wenigstens einen speziellen Fall genaue Ergebnisse zu gewinnen.

Der Beobachter Dr. Malinowski hatte sieben Jahre zuvor eine Chorioiditis centralis mit Exsudation durchgemacht; dabei war die macula lutea tangential ergriffen worden; besonders das rechte Auge wurde in Mitleidenschaft gezogen, und dort ist ein zentrales Skotoma hinterblieben. Der Beobachter pflegte beim Spazierengehen, oder bei ruhigem Im-Zimmer-Sitzen Nachbilder zu sehen, sobald er irgend erhebliche Helligkeitsunterschiede wahrgenommen hat. Daran gewöhnte er sich so sehr, daß es ihm keine Plage mehr ist. Nur wenn er sich

matt fühlt, belästigen ihn seine Nachbilderscheinungen; nach seiner Meinung erscheinen ihm dann positive Nachbilder heller als sonst. Bei den Versuchen war er gegenüber den stärksten der vorkommenden Reize (von 101 MLm und 244 MLm) empfindsam; zu Blendungsnachbildern kam es indessen nie. Die Versuchsergebnisse zeigten, daß der Beobachter positive Nachbilder heller bewertete als Goldschmidt, Schneider und Dr. Tichý und weniger hell als Biener. Wenn auch die angestellten Versuche nicht zahlreich genug waren, daß ihre Ergebnisse zur Berechnung einer Mittelwertkurve dienen dürften, bestätigte sich doch dieser Satz ausnahmslos. Es ist bemerkenswert, daß die Streuung der Versuchsergebnisse des Beobachters Dr. Malinowski schon von der zweiten Versuchsstunde an geringer weit war als selbst nach der besterreichten Übung[1]) bei den anderen Beobachtern außer Dr. Tichý, sie übertraf die bei Dr. Tichý vorkommende Streuung nur um ein geringes. (Die Beobachtungen von Dr. Malinowski wurden zumeist im Sommer gewonnen; an sehr hellen Tagen pflegte er dunkelgraue Augengläser zu tragen.)

Die Schwankungen in dem Grade der Ermüdung oder Frische des Beobachters von Versuchsreihe zu Versuchsreihe führen also wohl zu einer verschiedenen Genauigkeit in der Beobachtung der Nachbildhelligkeit, aber nicht zu verschieden hellen Nachbilderscheinungen.

Ob etwa durch Vermittelung eines bisher noch unbekannten Faktors die Tagesbeleuchtung, oder eine andere mit den Tagen sich ändernde Bedingung, einen Einfluß auf das Erscheinen der positiven Nachbilder hat, muß zunächst dahingestellt bleiben.

Durch den Einfluß eines an verschiedenen Tagen verschieden starken Eigenlichtes können von Versuchsreihe zu Versuchsreihe sich zeigende Schwankungen der Ergebnisse wenigstens hinsichtlich der Helligkeit von positiven Nachbildern ihre Erklärung finden. Bis jetzt lassen sich nämlich mit Wirth als Bedingungen für Nachbilderscheinungen bloße Erregbarkeitsänderungen der normalen Substrate und Beimischungen zur reagierenden Intensität proportionaler Miterre-

[1]) Vgl. o. S. 217/218.

gungen eines selbständigen Restsubstrates denken. Im ersteren Falle würden die in ihrer Komplexion als Eigenlicht charakterisierten Empfindungen entsprechend der Erregbarkeitsänderung das positive Nachbild bilden, im zweiten Fall würde das zum Erleben eines positiven Nachbildes führende Restsubstrat zum Eigenlicht als reagierender Intensität in funktioneller Beziehung stehen. Eine derartige Beziehung ist allerdings bisher nur für negative Nachbilder nachgewiesen, und in den von Wirth gefundenen Analogien zum Fechner-Helmholtzschen Satze zum Ausdruck gekommen; für positive Nachbilder steht nur fest, daß sie sich allein auf einer in seiner Helligkeit vom Nachbild-Reize stark verschiedenen reagierenden Fläche entwickeln.

Um nach einer Beziehung zwischen der Helligkeit eines positiven Nachbildes und der des reagierenden Lichtes zu forschen, wären die geschilderten Versuchsreihen unter Variation des reagierenden Lichtes fortzusetzen; da die Eigenlichtstärke bislang noch nicht bestimmt werden kann, wäre eine objektiv beleuchtete Fläche als reagierendes Licht zu geben. Es wäre eine besonders interessante Fortsetzung der Versuche, wie Wirth sie forderte, durch Erhellen des reagierenden Lichtes positive Nachbilder in negative umschlagen zu lassen, und unter diesen Bedingungen die quantitativen Bestimmungen der vorliegenden Arbeit fortzuführen. Leichter wäre wahrscheinlich der experimentelle Nachweis einer funktionellen Beziehung von positiven dunklen Nachbildern dunkler auf hellem Grunde dargebotener Reize zu verschieden hellen reagierenden Flächen; bei Vergleichung so gefundener Ergebnisse mit den hier wiedergegebenen müßte aber die Beziehung von Reizfeldgröße zur Nachbildhelligkeit berücksichtigt werden; es wäre also dann erst noch eine weitere Aufgabe zu lösen. Vielleicht würde sich zeigen lassen, daß jedem Reize eine bestimmte lokale Erregbarkeitsänderung als folgend gedacht werden kann, daß infolge dieser Erregbarkeitsänderung in der Auffassung die gleichzeitigen durch das reagierende Licht bedingten Empfindungen gemäß dem Fechner-Helmholtzschen Satze sich geltend machen, daß also die nämliche Empfindungsänderung durch ihre Wirkung auf Empfindungen, die das reagierende Licht auslöst, zur Auffassung einer positiven und negativen Nachbilderscheinung führen können. Es ließe sich vielleicht durch eine Fortsetzung der oben geschilderten Versuche unter Variation des reagierenden Lichtes zeigen, ob als

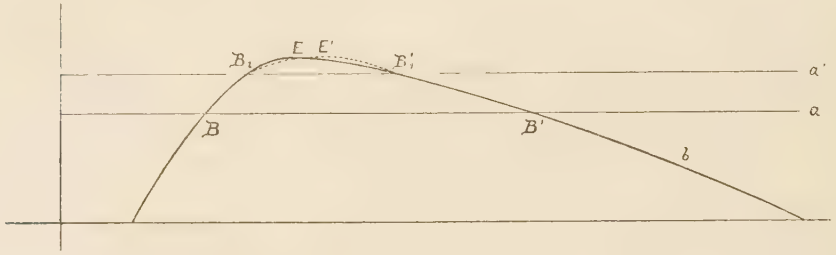
Bedingung für Nachbilderscheinungen am besten bloße Erregbarkeitsänderungen der normalen Substrate, oder die Beimischung einer zur reagierenden Intensität proportionalen Miterregung eines selbständigen Restsubstrates zu denken sind; damit ist aber eine besondere Problemstellung gegeben, die schon wegen des Umfanges der dazu nötigen Untersuchungen eine besondere Behandlung verdient. Mit den geforderten Versuchsreihen wurde begonnen.

Hypothetisch darf vorderhand wenigstens zweifellos eine funktionelle Beziehung vom Helligkeitswert des positiven Nachbildes und der Intensität des reagierenden Lichtes, im vorliegenden besonderen Falle auch der Eigenlichtstärke angenommen werden. Daß diese trotz ihres absolut sehr geringen Helligkeitswertes auf die Nachbildhelligkeit von wesentlichem Einfluß ist, erklärt sich aus der dem Nachbilde gegenüber beträchtlichen Höhe ihrer Helligkeit; und wie leicht die Eigenlichtstärke selbst zu beeinflussen ist, zeigt eine Beobachtung von Helmholtz[1]): es können selbst Athembewegungen das Eigenlicht der Netzhaut wesentlich ändern. Daß trotzdem die Eigenlichtstärke während sämtlicher Versuche einer selbst mehrstündigen Versuchsreihe hinsichtlich ihres Einflusses auf die Nachbildhelligkeit verhältnismäßig konstant sein kann, zeigen die Versuchsreihen, die zu den oben wiedergegebenen Bestimmungen der Unterschiedsschwellen[2]) führten. Ein Schwanken in der Eigenlichtstärke wird übrigens auch die Helligkeitsauffassung des Sekundärreizes, des Meßreizes selbst, infolge der Verschiedenheit des dabei mitwirkenden Simultankontrastes ändern; der Helligkeitswert des Sekundärreizes müßte sich unter diesem Einfluß in gleicher Richtung, aber in vermutlich weit geringerem Maße ändern als der des positiven Nachbildes. Die Erfahrung nämlich vom Schwinden des Eigenlichtes in der nächsten Umgebung eines bei sonst dunklem Gesichtsfeld dargebotenen, den Schwellenwert nur wenig übersteigenden Lichtreizes spricht dafür, daß die lokale Adaptation nach Einwirkung eines auch nur eben wahrnehmbaren Lichtreizes in einem sonst dunkeln Gesichtsfeld sich der Allgemeinadaptation gegenüber sehr erheblich ändert. Das Schwanken der Nachbildhelligkeiten von Versuchsreihe zu Versuchsreihe wäre durch die Wirkung der Tageshelligkeit auf die Eigen-

[1]) Helmholtz, Physiol. Optik², S. 365.

[2]) Vgl. Tab. II, S. 233.

lichtstärke erklärt. Mit dem Wachsen der Eigenlichtstärke würde danach die Nachbildhelligkeit sinken. Wenn nun ein bestimmter Reiz die nämliche Reihe von Erregbarkeitsänderungen oder den nämlichen Verlauf auslöst, so wäre es verständlich, daß bei wachsendem Eigenlicht die positiven Nachbilder mit ihrem schwächeren Erscheinen auch später auftreten und früher verschwinden. Zur Erläuterung diene die schematische Fig. 8; eine Kurve *a* mit der allgemeinen Eigenlichtstärke als Ordinate, mit den Zeiten nach dem Reizeintritt als Abszisse ist parallel zur Abszisse; die Kurve *b* entspreche dem Helligkeitsverlauf eines positiven Nachbildes; *a'* stellt eine Kurve stärkeren Eigenlichtes dar als Kurve *a*. Je weniger sich Kurve *b* über die Kurven *a* und *a'* erhebt, um so kürzer ist auch ihr Verlauf BEB' und B_1EB_1'. Der Zeitpunkt des hellsten Erscheinens E wird danach durch Schwankungen der Eigenlichtstärke nicht geändert.



Figur 8.
Hypothetische Kurven des positiven Nachbildes.

Bei den positiven Nachbildern, die durch sehr schwache Reize ausgelöst werden, mag das besonders späte Auftreten ihres hellsten Erscheinens vermehrt werden, wenn die Nachbildhelligkeit infolge einer größeren Stärke des Eigenlichtes dunkler erschien als sonst, indem nämlich Ansteigen und Sinken der Helligkeit des schwächsten positiven Nachbildes nicht genau, nicht als verschieden lang dauernd aufgefaßt, und indem daher das hellste Erscheinen des positiven Nachbildes als in der Mitte des ganzen Nachbilderscheinens (in E' statt in E[1]) der Fig. 8) liegend beurteilt wurde, während es bei stärkeren

[1]) E und E' sind in der Fig. 8 nicht übertrieben weit auseinander gezeichnet, vielmehr werden die noch nicht genauer bekannten Tatsachen möglicher Weise erfordern, daß sie noch weiter auseinander zu rücken sind.

Reizen nach dessen erstem Drittel oder Viertel aufzutreten scheint, wie das die schematische Fig. 8 andeuten soll, in *E*.

Durch die aufgestellte Hypothese von der Bedeutung des Eigenlichtes für den Verlauf der Nachbilderscheinung lassen sich die an verschiedenen Versuchstagen vorkommenden Schwankungen im Helligkeitswert positiver Nachbilder erklären; es wird verständlich, warum diese Schwankungen mit der Tageshelligkeit in Beziehung stehen; und es ist nunmehr erklärlich, warum das hellste Erscheinen positiver Nachbilder verspätet auftritt, wenn das Eigenlicht während der Beobachtung besonders stark war. Und nur für diesen Fall wurde das verspätete Auftreten der positiven Nachbilder deutlich erwiesen. Es sind somit alle für die Hypothese in Betracht kommenden Tatsachen durch sie erklärt. Beweisen läßt sich die Berechtigung der Hypothese aber erst durch Nachprüfung der obigen Sätze und ihrer Folgerungen mittels quantitativer Bestimmungen. Hierzu ist die Ausarbeitung einer Methode nötig, mittels der man die Eigenlichtstärke experimentell beeinflussen und messen kann. Für die Lösung dieser Aufgabe ist vielleicht die Beobachtung, daß es an sehr hellen Tagen (bei besonders starkem Eigenlicht) länger dauerte als sonst, bis der Fixierpunkt in seinen Umrissen scharf erkannt werden konnte, von heuristischem Wert. Vielleicht wird sich aber die Eigenlichtstärke nur durch ihren Einfluß auf die Helligkeitsbewertung positiver Nachbilder messen lassen, und die funktionelle Beziehung zwischen dem Helligkeitswert eines positiven Nachbildes und dem der reagierenden Fläche wäre unter Darbietung beleuchteter Flächen (deren Helligkeit gegenüber die Eigenlichtstärke verschwindend gering ist) festzustellen. Das sind indes neue Aufgaben, die schon wegen ihres Umfanges eine besondere Behandlung verdienen. Mit den dazu nötigen experimentellen Untersuchungen wurde begonnen.

Es wurde schon eingangs erwähnt, daß die Lösung der für die vorliegende Arbeit gestellten Aufgabe wohl die Grundlage abgibt für weitere theoretisch wichtige Untersuchungen, daß aber bislang noch hypothetische Sätze in der Lehre von den Gesichtsempfindungen die

Tatsachen, die hier beobachtet werden können, so allgemein zu behandeln pflegen, daß sich die erhaltenen Ergebnisse überall ohne weiteres einordnen lassen.

VII. Kurze Zusammenfassung der Hauptergebnisse der Arbeit.

Wieweit sich die in der vorliegenden Arbeit unter speziellen, für eine Beobachtung besonders günstigen Versuchsbedingungen gefundenen Ergebnisse verallgemeinern lassen, haben weitere Untersuchungen, die in der nächsten Abhandlung geschildert werden sollen, erwiesen. Zunächst lassen sich als mindestens unter den geschilderten Versuchsbedingungen gültig die folgenden Sätze aufstellen:

1. Je stärker ein Reiz ist, um so größer ist der Helligkeitswert des durch ihn ausgelösten positiven Nachbildes; in zwei korrespondierenden Reihen von Reizstärken und Nachbildhelligkeiten wachsen aber die Reizstärken durchgängig erheblich schneller als die Helligkeitswerte der positiven Nachbilder. Im Bereich der schwachen Reize ist die Progression in den Helligkeitswerten der positiven Nachbilder relativ am größten, im Bereich der stärkeren Reize nimmt sie allmählich immer mehr ab.

2. Sehr erhebliche Unterschiede in der Hell-Dunkel-Adaptation haben einen nur sehr geringen Einfluß auf den Helligkeitswert der positiven Nachbilder. Mit sehr stark wachsender Dunkeladaptation wächst der Helligkeitswert positiver Nachbilder ein wenig.

3. Für Nachbilderscheinungen im verdunkelten Gesichtsfeld ist das Eigenlicht als reagierende Fläche anzusehen. Mit dem Wachsen der Eigenlichtstärke sinkt der Helligkeitswert positiver Nachbilder.

4. Während entsprechend den Schwankungen der Eigenlichtstärke die absoluten Werte der Helligkeiten positiver Nachbilder, die von verschieden starken Reizen ausgelöst wurden, erheblich schwanken, sind die Relationen solcher bei konstanter Eigenlichtstärke (d. i. während einer einzelnen Versuchsstunde) gefundenen Werte für den nämlichen Beobachter in sehr hohem Grade konstant. Diese Relationen sind für verschiedene Beobachter nur annähernd gleich.

5. Der Helligkeitswert eines positiven Nachbildes ist vom Farbenton seines Reizes wenigstens annähernd unabhängig.

6. Speziell optische oder allgemeine Ermüdung des Beobachters führen wohl zu einer verschiedenen Genauigkeit in der Beobachtung

von Nachbildhelligkeiten, aber nicht zu einer Änderung im Helligkeitswert der positiven Nachbilder; insbesondere bestätigt sich nicht die gerade nach einer Ermüdung vorkommende Vermutung der Beobachter, ihre positiven Nachbilder würden ungewöhnlich hell bewertet, weil sie ihnen besonders lebhaft erscheinen.

7. Der Helligkeitsvergleich eines positiven Nachbildes mit einem (Sekundär-) Reiz führt zu dem gleichen Ergebnis, ob dieser Reiz kurz vor, oder gleichzeitig mit, oder etwas nach dem positiven Nachbilde auftritt.

8. Die relative Unterschiedsschwelle beim Helligkeitsvergleichen von verschieden hellen positiven Nachbildern mit gleichzeitig dargebotenen Meßreizen ist konstant; sie beträgt $^1/_5$ bis $^1/_{10}$ und ist drei bis viermal größer als beim Vergleichen zweier in entsprechender Weise objektiv dargebotener Helligkeiten.

Vita.

Der Verfasser vorstehender Abhandlung wurde am 25. Juli 1883 als Sohn des im Jahre 1901 verstorbenen Landgerichtsrates a. D. Richard Goldschmidt geboren; er ist evangelischer Konfession. Am 5. März 1902 erhielt er nach neunjährigem Gymnasiumsbesuch im humanistischen Gymnasium in Wiesbaden das Zeugnis der Reife. In der Absicht, sich der experimentellen Psychologie zu widmen, trieb er dann naturwissenschaftliche, medizinische, ethnologische, psychologische und philosophische Studien.

Außer den vorbereitenden Vorlesungen besuchte er während seiner Studienzeit in den Universitäten Heidelberg, München, Straßburg und Leipzig das mathematische Unterseminar bei Geheimrat Prof. Dr. Königsberger, das mineralogische Praktikum bei Geh. Oberbergrat Prof. Dr. Rosenbusch, das zweisemestrige physikalische Praktikum bei Geheimrat Prof. Dr. Röntgen, sowie zwei Semester lang dessen Praktikum für Fortgeschrittene (dort führte er eine Wiederholung der Feddersenschen Versuche durch), ferner besuchte er das botanisch-mikroskopische Praktikum bei Prof. Dr. Goebel, die Übungen zur darstellenden Geometrie und die Übungen zur neueren Geometrie bei Prof. Dr. Doehlemann, während zweier Semester das chemische Praktikum bei Geheimrat Prof. Dr. v. Baeyer (dort machte er den für Chemiker vorgeschriebenen Kurs über anorganische Chemie durch), das chemische Praktikum für Mediziner bei Prof. Dr. Hofmeister (dort machte er einige organische Synthesen), den praktisch physiologischen Kurs bei Prof. Dr. Ewald, den Kurs der vegetativen Physiologie bei Privatdozenten Dr. Spiro, die Präparierübungen bei Prof. Dr. Rückert, den histologischen Kurs bei Prof. Dr. Mollier, den Kursus der Elektrophysiologie bei Prof. Dr. Cremer, die Präparierübungen bei Dr. Hasselwander, den topographisch-anatomischen Demonstrationskurs bei Dr. L. Neumayer, den zoologischen Kurs bei Geheimrat Prof. Dr. Hertwig, die Präparierübungen bei Prof. Dr. Rabl, den Kursus der Perkussion und Auskultation bei Dr. Rolly, den Kursus der klinisch-chemischen und mikroskopischen Untersuchungsmethoden bei Dr. Steinert, den Augenspiegelkurs bei Prof. Dr. Bielschowsky, den Kurs über Untersuchungsmethoden von Hals, Nase und Ohr bei Dr. Heymann, sowie nach vollständig bestandenem ärztlichem Zwischenexamen die chirurgische Klinik bei Prof. Dr. Angerer, zweimal die psychiatrische Klinik bei Geheimrat Prof. Dr. Kraepelin, die medizinische Poliklinik pro Reisingeriano bei Prof. Dr. May, die medizinische Klinik bei Prof. Dr. v. Müller, den

Impfkurs und die Klinik der Kinderkrankheiten bei Prof. Dr. Pfaundler, die klinischen Übungen in der Behandlung von Nervenkrankheiten bei Dr. Sittmann, das Praktikum der Ohren-, Nasen- und Halskrankheiten bei Prof. Dr. Barth, den klinischen Unterricht in der Augenheilkunde bei Prof. Dr. Sattler, die Übungen in den Funktionsprüfungen des Auges bei Prof. Dr. Bielschowsky, die geburtshilflich-gynäkologische Klinik und Poliklinik bei Geheimrat Prof. Dr. Zweifel, die medizinische Klinik bei Geheimrat Prof. Dr. Curschmann, zudem famulierte er in der ehedem Mendelschen Privatirrenanstalt des Dr. Scholinus in Pankow.

Ferner arbeitete er während sechs Semester im psychologischen Institut bei Sr. Exzellenz Geheimrat Prof. Dr. Wundt und Prof. Dr. Wirth, zudem besuchte er neben vorbereitenden Vorlesungen meist während mehrerer Semester die Seminare, Übungen und Colloquia der Herren Prof. Dr. Barth, Geheimrat Prof. Dr. Heinze, Prof. Dr. Krüger, Geheimrat Prof. Dr. Lamprecht, Prof. Dr. G. F. Lipps, Prof. Dr. Th. Lipps, Geheimrat Prof. Dr. Röntgen, Geheimrat Prof. Dr. Schmarsow, Prof. Dr. Weule.

Allen seinen Dozenten, besonders auch Herrn Geheimrat Wundt, der nicht nur sein vornehmlichster Lehrer war, sondern auch speziell bei der hier vorliegenden Arbeit ihm jede mögliche Unterstützung gewährte, sowie allen Herren, die ihm durch Beobachten oder Experimentieren bei seiner Arbeit halfen, vor allen Herrn Prof. Dr. Wirth, dem von vornherein geübtesten Beobachter, dem er auch manchen freundlichen Rat zu verdanken hat, und seinen ausdauerndsten Mitarbeitern, den Herren Biener, Schneider und Dr. Tichý spricht er seinen herzlichsten Dank aus. Ferner hat ihn seine Mutter auch bei dieser Arbeit durch Übersetzung englischer Abhandlungen, sowie durch Kontrolle der Rechnungen unterstützt; ihr ist die Arbeit gewidmet.

Druck von Breitkopf & Härtel Leipzig.